

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

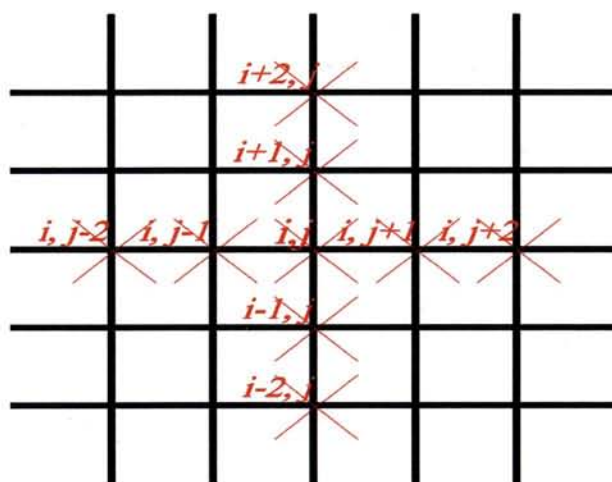
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΚΩΔΙΚΑ ΤΡΙΒΟΛΟΓΙΚΗΣ
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ ΕΜΒΟΛΟΥ Μ.Ε.Κ. .

(Βελτίωση αλγορίθμου – Προτάσεις για εμπλουτισμό του κώδικα)



$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\Phi_x h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Phi_y h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6\eta(u_1 - u_2) \frac{\partial h_T}{\partial x} + 6(u_1 - u_2) \frac{\partial h_T}{\partial x} \sigma_{\rho\sigma} \frac{\partial \Phi_s}{\partial x} + 12\eta \frac{\partial h_T}{\partial t}$$

Χρήστος Β. Γίδαρης

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας

Βόλος 2011



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.:	9978/1
Ημερ. Εισ.:	01-11-2011
Δωρεά:	Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός:	ΠΤ – ΜΜ
	2011
	ΓΙΔ

© 2011 Γίδαρης Χρήστος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής Δρ. Πανταζάρας Κωνσταντίνος
(Επιβλέπων) Διδάσκων, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
 Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Σπύρος Καραμάνος
 Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
 Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Χασιώτης Νικόλαος
 Διδάσκων, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
 Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, διδάσκοντα κ. Κωνσταντίνο Πανταζάρα, για την πολύτιμη βοήθεια, καθοδήγησή και συμπαράστασή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητές κκ. Σπύρο Καραμάνο και Νικόλαο Χασιώτη για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Οφείλω ευχαριστίες σε όλους τους καθηγητες και το προσωπικό του τμήματος που αφιέρωσαν το χρόνο τους βοηθώντας με σε πολλές περιπτώσεις να συνεχίσω τον ανηφορικό δρόμο της μάθησης του αντικειμένου με το οποίο ασχολήθηκα. Ευχαριστώ τους φίλους μου Φαίη Παπούλια , Σωτήρη Μπάτο , Χάρη Χατζηιωάννου ,Κωνσταντίνο Χατζηχρίστο, Μηχάλη Γεωργιάδη για την πολύτιμη ηθική καθώς και πρακτική συμπαράσταση τους στην ευχάριστη και εν μέρει δύσβατη πορεία μου ως φοιτητής .*Πάνω απ' όλα, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου, Βαγγέλη και Ευαγγελία, και την αδερφή μου Μαρία ,γιατί με την αγάπη και με την φροντίδα τους όλα αυτά τα χρόνια κατάφερα να επιτύχω το σημαντικότερο μέχρι στιγμής όνειρο της ζωής μου .*

Γίδαρης Χρήστος

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΚΩΔΙΚΑ ΤΡΙΒΟΛΟΓΙΚΗΣ
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ ΕΜΒΟΛΟΥ Μ.Ε.Κ. .**

(Βελτίωση αλγορίθμου – Προτάσεις για εμπλουτισμό του κώδικα)



ΧΡΗΣΤΟΣ ΓΙΔΑΡΗΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2011

**Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Πανταζάρας Κωνσταντίνος Διδάσκων, Τμήμα
Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας**

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι απώλειες λόγω τριβών που οφείλονται στους δακτυλίους του εμβόλου μιας μηχανής εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ) καλύπτουν περίπου το 20% του συνόλου των μηχανικών απωλειών του κινητήρα. Μείωση αυτών των τριβών επιτρέπει έναν υψηλότερο βαθμό απόδοσης, μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, καθώς και αντίστοιχη των εκπομπών ρύπων.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να προτείνει βελτιώσεις σε υπολογιστικό κώδικα που χρησιμοποιείται για την θεωρητική μελέτη της τριβολογικής συμπεριφοράς των ελατηρίων δακτυλίων εμβόλων Μηχανών Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ). εμπλουτισμένα αποτελέσματα αναδεικνύονται μέσα από την ανάπτυξη και χρήση του βελτιωμένου μοντέλου.

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων οδηγεί σε ενδιαφέροντα συμπεράσματα κυρίως για τους κατασκευαστές και συντείνουν στην βελτίωση της απόδοσής των ΜΕΚ σε μια περίοδο μάλιστα που ολοένα και περισσότερο εμφανίζεται εντονότερο το φαινόμενο των κλιματικών αλλαγών εξαιτίας των εκπεμπόμενων ρύπων των μη πράσινων κινητήρων ΜΕΚ και η απαίτηση για οικονομία στην κατανάλωση καυσίμου ενός κινητήρα ΜΕΚ είναι ένας από τους πιο βασικούς παράγοντες στην αγορά ενός αυτοκινούμενου προϊόντος.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	11
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ.....	15
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	17
Ε.1. Εισαγωγή.....	19
Ε.2. Δακτύλιοι εμβόλων ΜΕΚ.	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	31
Εισαγωγή-Θεωρητικό Υπόβαθρο	31
1.1 Τα μοντέλα μικτής λίπανσης για δακτύλιο εμβόλου Μ.Ε.Κ.	32
Συνδυασμός μοντέλου Patir-Cheng και μοντέλου Greenwood-Trip.....	32
1.2 Το θεωρητικό Μοντέλο	41
Επίδραση της μικρογεωμετρίας των επιφανειών κυλίνδρου και δακτυλίου ...	43
1.3 Πεπερασμένες Διαφορές	50
1.4 Θεωρητικά Αποτελέσματα	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	63
Ανάλυση αλγορίθμου και αλλαγών που έγιναν στον κώδικα	63
2.1 Εισαγωγή δεδομένων.....	67
2.2 Κατασκευή του προφίλ του δακτυλίου	69
2.3 Εισαγωγή συντελεστών με σκοπό την δημιουργία διορθωτικών συντελεστών ροής	71
2.4 Προσέγγιση πάχους λιπαντικής μεμβράνης και κατασκευή των διορθωτικών συντελεστών ροής	71
2.5 Γραμμική ταχύτητα εμβόλου και συντελεστές εξίσωσης Reynolds	74
2.6 Επίλυση του γραμμικού συστήματος που προκύπτει της μορφής $A \cdot x = B$	76
2.7 Υπολογισμός φορτίων και δυνάμεων	78
2.8 Έλεγχος ισορροπίας.....	81
2.9 Συγκέντρωση ,αποθήκευση ,σχεδίαση αποτελεσμάτων	83
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	93

Αποτελέσματα-Διορθωτικοί συντελεστές ροής	93
3.1 διορθωτικοί συντελεστές ροής	94
3.2 Αποτελέσματα	100
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	151
Συμπεράσματα-Προτάσεις Βελτίωσης-Προοπτικές.....	151
4.1 Συμπεράσματα.....	152
4.2 Προτάσεις Βελτίωσης.....	156
4.3 Προοπτικές	163
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	165

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

A : πραγματική επιφάνεια επαφής Greenwood

A :φαινόμενη επιφάνεια επαφής

E_i , $i=1,2$: το μέτρο ελαστικότητας του υλικού

ν_i , $i=1,2$ συντελεστής Poisson

F : η δύναμη τριβής,

h : πάχος λιπαντικής μεμβράνης

h_{min} : ελάχιστο πάχος λιπαντικής μεμβράνης (ή h_o)

h_T : στοχαστική τιμή πάχους λιπαντικής μεμβράνης

η :η πυκνότητα των λοφίσκων.

N ή RPM : συχνότητα περιστροφής κινητήρα [ανά λεπτό]

P ή p : υδροδυναμική πίεση

P_{mf} : Μέση πίεση απωλειών λόγω τριβής

P_{tar} :η ομοιόμορφα κατανεμημένη πίεση μεταξύ δακτυλίου κυλίνδρου

p_{max} : μέγιστη τιμή υδροδυναμικής πίεσης δακτυλίου κυλίνδρου

R_c :ακτίνα του στροφαλοφόρου

$R_{xx}(\lambda)$: Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης τραχύτητας κατά την κατεύθυνση x

U : η γραμμική ταχύτητα κίνησης του εμβόλου

V : ο όγκος του κυλίνδρου.

W_{tar} : φορτίο δακτυλίου

W_{tot} : Ολικό φορτίο επαφής

$W_{tot a}$: Φορτίο που παραλαμβάνεται από την τραχύτητα

$W_{tot h}$: Υδροδυναμικό φορτίο

F_{tot} : ολική δύναμη τριβής

F_{tota} : Συνιστώσα της τριβής που οφείλεται στην παραμόρφωση της τραχύτητας

F_{toth} : υδροδυναμική συνιστώσα της τριβής

x : περιφερειακή κατεύθυνση

y : αξονική κατεύθυνση

$\Delta x, \Delta y$ (X : Η κατεύθυνση κατά τον άξονα ου κυλίνδρου και Y : κατά την περιφέρεια)

$\gamma = \frac{\lambda_{0,5x}}{\lambda_{0,5y}}$ γ , γ : ο δείκτης ανισοτροπίας της τραχείας επιφάνειας που χαρακτηρίζεται από τον λόγο των μηκών κύματος $\lambda_{0,5x}$ και $\lambda_{0,5y}$

β ή φ : η γωνία περιστροφής του στροφαλοφόρου

β : είναι η μέση τιμή της ακτίνας καμπυλότητας της ακτίνας των λοφίσκων.

η : δυναμικό/απόλυτο ιξώδες λιπαντικού (στον κώδικα εμφανίζεται ως **Eta**).

θ_m : μέση θερμοκρασία λειτουργίας δακτυλίου

θ_ψ : θερμοκρασία κατασκευής και μετρήσεως ανοχών

$\lambda_{0,5x}, \lambda_{0,5y}$: Μήκη κύματος 50% των συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης R_{xx}, R_{yy} στα οποία η αρχική τιμή της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης της τραχύτητας πέφτει στο ήμισυ της αρχικής τιμής της.

M = μήκος διωστήρα-μπιέλλας

μ : συντελεστής τριβής $\mu = F/w$

σ_{po} : τυπική απόκλιση της ολικής τραχύτητας τριβέα-στροφέα

σ η τιμή **rms** της κατανομής του πληθυσμού των υψομέτρων σημείων της επιφάνειας του κυλίνδρου,

σ' η τιμή **rms** της κατανομής του πληθυσμού των υψομέτρων των κορυφών των λόφων της επιφάνειας του κυλίνδρου,

y_o η απόσταση των μέσων τιμών των πληθυσμών των υψομέτρων σημείων και κορυφών λοφίσκων της κατανομής αντίστοιχα

ω : γωνιακή ταχύτητα στροφέα

Φ_x, Φ_z : παράγων ροής-πίεσης, Φ_s : παράγων ροής-διάτμησης

HD : Υδροδυναμικός, EHD : Ελαστο-υδροδυναμικός

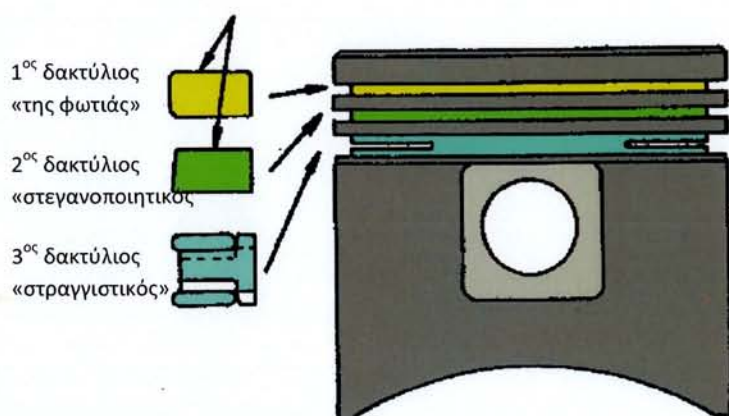
THD : Θερμο-υδροδυναμικός, $TEHD$: Θερμο-ελαστο-υδροδυναμικός

$2D$: 2 διαστάσεων

$3D$: 3 διαστάσεων

FDM : μέθοδος πεπερασμένων διαφορών

ΕΙΣΑΓΩΓΗ



Ε.1. Εισαγωγή

Η προσπάθεια λεπτομερούς προσδιορισμού της *τριβολογικής συμπεριφοράς των δακτυλίων εμβόλων* ιστορικά ξεκίνησε κατά την εποχή των ατμομηχανών και βρήκε έντονη ανταπόκριση κατά τα μεταπολεμικά χρόνια. Από τότε έως τις μέρες μας, πληθώρα πειραματικών, θεωρητικών αλλά και μικτού τύπου προσεγγίσεων βλέπουν το φως της δημοσιότητας, αναδεικνύοντας σημαντικά αποτελέσματα από τα βήματα που έχουν ήδη επιτευχθεί.

Η ποικιλία των δραστηριοτήτων σχετικά με το συγκεκριμένο αντικείμενο φαίνεται ότι δεν έχει ακόμη δώσει τις απαιτούμενες πλήρεις, σαφείς και τελικές απαντήσεις. Για το λόγο αυτό εμφανίζεται συνεχής έρευνα για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς των δακτυλίων, για διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, διαφορετικούς τύπους δακτυλίων, διαφορετικά και νέα υλικά, ποικίλη τοπογραφία των τραχειών συνεργαζομένων επιφανειών, υφιστάμενες μεταβολές στο πεδίο του χρόνου κ.α.

Η σημαντική απόκλιση της πραγματικής λειτουργίας των δακτυλίων σε σχέση με τις βασικές υποθέσεις που λαμβάνονται υπ' όψη στην θεωρητική ερμηνεία/αποσαφήνιση της τριβολογικής συμπεριφοράς των δακτυλίων εμβόλων ΜΕΚ οφείλεται στα παρακάτω στοιχεία:

Η γεωμετρία των τριβομένων στοιχείων (δακτυλίου και κυλίνδρου) απέχει της γεωμετρίας κυλινδρικής συμμετρίας που πλείστες όσες φορές γίνεται δεκτή σε θεωρητικά προσομοιωτικά μοντέλα.

Η υπόθεση του πλήρως και με αφθονία λιπαντικού λιπαινομένου δακτυλίου όχι μόνο δεν αποδεικνύεται στην πράξη αλλά αντιθέτως απαιτεί εκ βάθρων αναθεώρηση, χωρίς όμως συγχρόνως να διατίθενται επαρκή στοιχεία επανατοποθέτησης του προβλήματος.

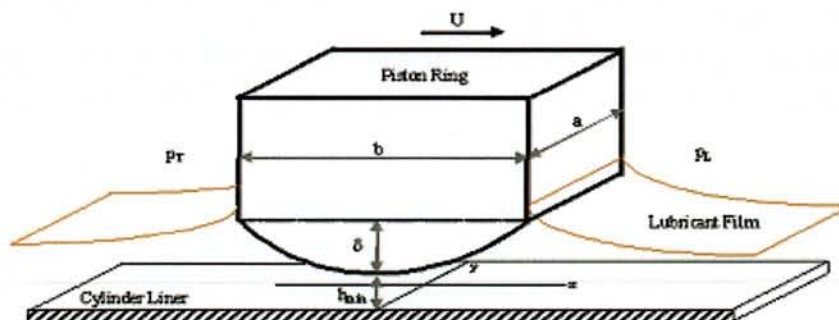
Η υπόθεση του πλήρως και με αφθονία λιπαντικού λιπαινομένου δακτυλίου όχι μόνο δεν αποδεικνύεται στην πράξη αλλά αντιθέτως απαιτεί εκ βάθρων αναθεώρηση, χωρίς όμως συγχρόνως να διατίθενται επαρκή στοιχεία επανατοποθέτησης του προβλήματος.

Η τραχύτητα των τριβομένων επιφανειών πρέπει οπωσδήποτε να λαμβάνεται υπ' όψη και μάλιστα στην μακράν απέχουσα από κανονικές κατανομές μορφή της .

Η ισορροπία του δακτυλίου αποτελεί δυσεπίλυτο πρόβλημα σε περίπτωση που ληφθούν υπ' όψη όλες οι παράμετροι (βαθμοί ελευθερίας, δυνάμεις-ροπές που εξασκούνται) σε συνδυασμό με υπολογιστικές πολυπλοκότητες (μέθοδοι

πεπερασμένων στοιχείων, πεπερασμένων διαφορών) για τον λεπτομερή προσδιορισμό της λιπανόμενης επαφής και την επίλυση της εξίσωσης λίπανσης.

Το συνολικό πρόβλημα απαιτεί λύση λαμβανομένης υπ' όψη της αλληλεπίδρασης των δακτυλίων μέσα στην πλήρη συστοιχία τους, γεγονός που απαιτεί αλληλέγγυους διαδοχικούς υπολογισμούς, αποτελέσματα των οποίων οφείλουν να τροφοδοτούν, υπό την μορφή δεδομένων πλέον, τους υπολογισμούς που έπονται.



Σχήμα Ε.1 : Κλασσικό μοντέλο που χρησιμοποιείται κατά την ανάλυση του προβλήματος λίπανσης δακτυλίου εμβόλου MEK.

Επειδή όμως, η θεωρητική προσομοιωτική επεξεργασία αποτελεί κατ' εξοχήν χρήσιμο εργαλείο για την πλήρη κατανόηση της τριβολογικής λειτουργίας των δακτυλίων εμβόλου MEK, η συνεχής επικοινωνία με την πειραματική επιβεβαίωση ή διαφοροποίηση, θεωρείται ικανή και αναγκαία συνθήκη για κάθε προσεχές βήμα.

Στα πλαίσια λοιπόν μίας συνεχούς ροής πληροφοριών στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται θεωρητικά αποτελέσματα που φαινομενολογικά χαρακτηρίζουν την τριβολογική συμπεριφορά μεμονωμένων δακτυλίων εμβόλων MEK. Η συγκεκριμένη γεωμετρία και κινηματική καθώς και οι συνθήκες λίπανσης του κυλίνδρου που επελέγησαν, χαρακτηρίζουν πραγματικούς κινητήρες MEK, χωρίς καμία επιπρόσθετη μετατροπή.

Ε.2. Δακτύλιοι εμβόλων ΜΕΚ.



Σχήμα Ε.2: Δακτύλιοι εμβόλου ΜΕΚ διαφορετικών κατατομών.

Ο δακτύλιος του εμβόλου είναι ένα πολύπλοκης συμπεριφοράς, ίσως δε το πιο ενδιαφέρον τριβολογικό στοιχείο που συναντάται στο αυτοκίνητο. Υφίσταται ευρείες και ταχείες μεταβολές του φορτίου του, της ταχύτητάς του, της θερμοκρασίας και της διαθεσιμότητας λιπαντικού, με αποτέλεσμα μια λειτουργία κάτω από συνθήκες οριακής, μικτής, πλήρως υδροδυναμικής αλλά ακόμη και μικροελαστοϋδροδυναμικής λίπανσης σε περιπτώσεις κινητήρων Diesel ή βενζίνης κατά τη φάση της εκτόνωσης μετά την ανάφλεξη του μίγματος.

Έχει ήδη γίνει κοινή αντίληψη ότι στους σύγχρονους κινητήρες, οι απώλειες ισχύος λόγω τριβών στους κυλίνδρους οφειλόμενες εν μέρει στο τριβοσύστημα εμβόλου-κυλίνδρου και εν μέρει στο τριβοσύστημα ελατηριωτών δακτυλίων εμβόλου - κυλίνδρου έχουν μειωθεί σημαντικά μέσα από διαδικασίες ανάλυσης και βελτίωσης του σχεδιασμού. Γενικά είναι επίσης δεκτό, ότι το ποσοστό απωλειών που οφείλεται στους δακτυλίους είναι σημαντικότερο απ' αυτό του εμβόλου κυρίως λόγω της συνεχούς επαφής τους κατά την διάρκεια του κύκλου σε αντίθεση με το έμβολο που ο βαθμός ελευθερίας του σε περιορισμένη περιστροφή γύρω από τον άξονα/πείρο του, το υποχρεώνει σε μερική επαφή με τον κύλινδρο σε συγκεκριμένες περιοχές της διαδρομής του (εξ ου και η ιδιαίτερη μορφή της ποδιάς του, σχήμα μπομπέ - οβάλ, αφαίρεση πλαϊνών για μείωση τριβής κλπ).

Το ποσοστό αυτό των απωλειών που οφείλονται στους δακτυλίους και μόνο αγγίζει το 20% των συνολικών μηχανικών απωλειών ενός κινητήρα. Οι απώλειες συνήθως χαρακτηρίζονται από την τιμή της p_{mf} (kPa). Η p_{mf} είναι η απώλεια μέσης πίεσης λόγω τριβών μέσα στον πλήρη κύκλο 4-χρονου κινητήρα:

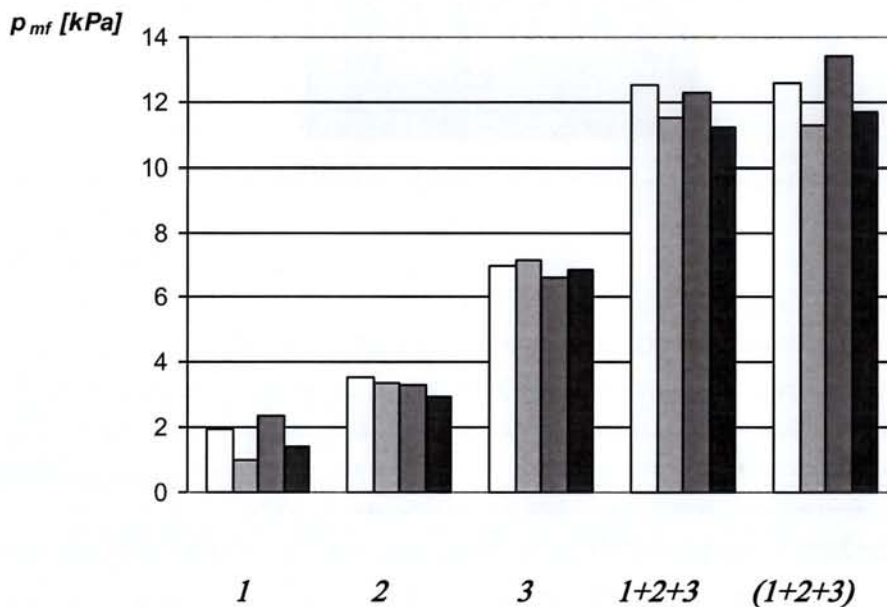
$$p_{mf} = \int_0^{4\pi} F(\beta)U(\beta)d\beta / V$$

Όπου: F : η δύναμη τριβής,

U : η γραμμική ταχύτητα κίνησης του εμβόλου,

β : η γωνία περιστροφής του στροφαλοφόρου

και V : ο όγκος του κυλίνδρου.



Σχήμα Ε.3: Απώλειες από τριβή p_{mf} [kPa] για τους δακτυλίους εμβόλου σε συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας*.

1: ο πρώτος δακτύλιος (της φωτιάς)

2: ο δεύτερος δακτύλιος (στεγάνωσης)

3: ο τρίτος δακτύλιος (στράγγισης)

1+2+3 : συνθετικές απώλειες, άθροισμα των απωλειών μεμονωμένων δακτυλίων

(1+2+3): ολικές απώλειες συστοιχίας, οι τρεις δακτύλιοι μαζί σε οδηγούμενο έμβολο

* Συνθήκες λειτουργίας: περιστροφική ταχύτητα/ιξώδες λιπαντικού

500 rpm/70 mPa.s, 500 rpm/11 mPa.s, 955 rpm/70 mPa.s, 955 rpm/11 mPa.s

Μετρήσεως σε προσομοιωτή πρώτης γενιάς, γεωμετρία MEK Renault 851-541cm³/κύλινδρος

Είναι αυτονόητο ότι στον υπολογισμό της P_{mf} σημαντική είναι η συνεισφορά της δύναμης τριβής στο μέσο της διαδρομής παρά στις περιοχές των νεκρών σημείων (ΑΝΣ και ΚΝΣ), και αυτό διότι ενώ στις περιοχές αυτές οι δυνάμεις τριβής αυξάνονται λόγω επαφών των μεταλλικών στοιχείων, οι μικρές ή μηδενικές τιμές της ταχύτητας έχουν σαν συνέπεια τον μηδενισμό της ισχύος απωλειών άρα της τιμής του γινομένου $F(\beta)U(\beta)$ μέσα στο ολοκλήρωμα της P_{mf} .

Έτσι, μπορεί κανείς γενικά να δεχθεί ότι η σύγκριση με βάση την P_{mf} εμπεριέχει και χαρακτηριστικά σύγκρισης δυνάμεων τριβής σε περιοχές αυξημένης τιμής της ταχύτητας του εμβόλου.

Το υλικό του κυλίνδρου απαιτεί συγκεκριμένη συμπεριφορά ελατηρίων. Βάση για τις δύο βασικότερες κατηγορίες υλικών κυλίνδρου είναι αφ' ενός ο χυτοσίδηρος και αφ' ετέρου τα κράματα αλουμινίου. Στη δεύτερη κατηγορία, τα συνεργαζόμενα έμβολα διαθέτουν ελατήρια μεγάλης στιβαρότητας, με ρόλο να μην επιτρέπουν εκτός των άλλων την παραμικρή επαφή κυλίνδρου-εμβόλου.

Οι κύλινδροι ελαφρών κραμάτων θεωρούνται ότι εμφανίζουν σημαντικά μειωμένες φθορές σε σχέση με τους παραδοσιακούς και εκτός των άλλων συγκριτικών πλεονεκτημάτων τους αναφέρονται οι παρόμοιοι συντελεστές θερμικής διαστολής εμβόλου-κυλίνδρου που οδηγούν σε μικρότερα διάκενα συναρμολόγησης-λειτουργίας, βελτιωμένη στεγανότητα, μειωμένη κατανάλωση λαδιού, μικρότερο βάρος και καλύτερη θερμική αγωγιμότητα. Στη γενικότητά τους όμως, οι κύλινδροι MEK κατασκευάζονται από χυτοσίδηρο. Χυτοσίδηρος (ή και χάλυβας) χρησιμοποιείται και για την κατασκευή των ελατηριωτών δακτυλίων του εμβόλου. Η ποιότητα που απαιτείται για τον χυτοσίδηρο των δακτυλίων είναι βελτιωμένη έτσι ώστε να τους προσδίδει την απαιτούμενη ελαστικότητα και να καθίσταται δυνατή η χωρίς πρόβλημα τοποθέτησή τους στις αντίστοιχες εγκοπές/φωλιές του εμβόλου, τοποθέτηση που απαιτεί σημαντικό «άνοιγμα» του δακτυλίου.

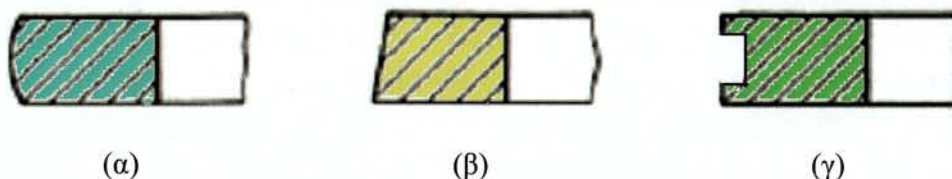
Ο διακριτός ρόλος κάθε δακτυλίου χαρακτηρίζεται από την θέση, την διατομή του που καθορίζει και τα χαρακτηριστικά επαφής του με τον κύλινδρο, καθώς και την ελαστική του επενέργεια που στοχεύει στην δημιουργία φορτίου επαφής και δίνει την

δυνατότητα ώστε σε συστοιχία με τους υπόλοιπους δακτύλιους να επιτελέσει το σύνθετο έργο του, δηλαδή την στεγανοποίηση του θαλάμου καύσης και την αποφυγή blow by, την οδήγηση του εμβόλου, τον έλεγχο της λίπανσης ολοκλήρου του παλινδρομούντος συστήματος εμβόλου-δακτυλίων, καθώς και τον έλεγχο κατανάλωσης λιπαντικού.

Κάθε δακτύλιος, μετά την τοποθέτησή του σε θέση λειτουργίας δρα αναλόγως ή με ομοιόμορφα κατανεμημένη ή ακόμη και μεταβαλλόμενη ακτινική πίεση πάνω στην επιφάνεια του κυλίνδρου. Εμφανίζοντας διάκενο, το οποίο του αφαιρεί την κυλινδρική του συμμετρία, ξεπερνά αστοχίες κατά το άνοιγμα και την τοποθέτησή του πάνω στο έμβολο (άνοιγμα 8 φορές το ονομαστικό διάκενο χωρίς προβλήματα παραμενουσών παραμορφώσεων και λοιπές αστοχίες) με εσωτερική σφυρηλασία και ισχυρότερα κτυπήματα στην περιοχή που βρίσκεται αντιδιαμετρικά της τομής/διακένου. Το ελεύθερο διάκενο στην περιοχή τομής του δακτυλίου, αντιστοιχεί σε ποσοστό 0.25 % της διαμέτρου του κυλίνδρου και οφείλει να παραμένει, έστω και μερικώς, ανοικτό κατά την λειτουργία της MEK κάτω από εξόχως έντονα θερμοκρασιακά πεδία. Στην παρούσα διπλωματική εργασία ο δακτύλιος θεωρείται συμμετρικός, χωρίς διάκενο.

Τα ελατήρια-δακτύλιοι κατατάσσονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: στα ελατήρια συμπίεσης-στεγανοποίησης του θαλάμου καύσης και στα ελατήρια λαδιού, σκοπός των οποίων είναι η απόξεση του κυλίνδρου. Τα τελευταία χαρακτηρίζονται από οπές διέλευσης λιπαντικού, ώστε το λάδι να επιστρέφει μέσα από διαύλους στην κάτω του εμβόλου περιοχή και τελικά στην ελαιολεκάνη. Οι δακτύλιοι της δεύτερης κατηγορίας συναντώνται είτε στο πάνω μέρος του εμβόλου, τελευταίοι σε συστοιχία με τους υπόλοιπους, είτε και μεμονωμένοι στην κάτω περιοχή της ποδιάς του εμβόλου.

E.2.1 Κατηγοριοποίηση δακτυλίων εμβόλων MEK.



Σχήμα E.4: α) δακτύλιος πρώτος «της φωτιάς»

β) δακτύλιος δεύτερος «στεγανωτικός»

γ) δακτύλιος τρίτος «αποξεστικός»

Κατά το λεγόμενο Αμερικανικό μοντέλο, ο αριθμός των δακτυλίων είναι 3. Οι δύο πρώτοι (προς τον Θάλαμο Καύσης) είναι δακτύλιοι στεγανοποίησης και ο τρίτος (προς την ελαιολεκάνη) είναι δακτύλιος απόξεσης.

Ο πρώτος (N^o 1) δακτύλιος ονομάζεται και «της φωτιάς», ο δεύτερος (N^o 2), ο μεσαίος, είναι ο κατ' εξοχήν «στεγανωτικός» όπως συνηθίζεται να ονομάζεται, και ο τρίτος (N^o 3) καλείται «αποξεστικός» ή «του λαδιού».

Η λίπανση των δακτυλίων αυτών επιτελούμενη με την βοήθεια υγρού λιπαντικού που συγχρόνως πρέπει να ικανοποιεί και απαιτήσεις λίπανσης εδράνων καθώς και ωστηρίων - έγκεντρων, μπορεί να θεωρηθεί μικτού χαρακτήρα με σημαντική συνιστώσα αυτή της μη υδροδυναμικής λίπανσης-τριβής.

Ο **πρώτος δακτύλιος «της φωτιάς»**, δέχεται κατά την φάση της εκτόνωσης εντονότερα αλλά και κατά την συμπίεση λιγότερο έντονα, την επιπρόσθετη πίεση του αερίου μίγματος που προστίθεται στην ελαστική του πίεση. Έτσι, το φορτίο επαφής του μεταβάλλεται σημαντικά μέσα στον θερμοδυναμικό κύκλο, γεγονός που εμφανίζεται πολύ πιο υποβαθμισμένης σημασίας στον δεύτερο δακτύλιο (έως και αμελητέο, αν και υπαρκτό λόγω blow by).

Ο δακτύλιος της φωτιάς είναι ο μόνος που παρουσιάζεται με κατατομή που εμφανίζει συγκλίνουσα και αποκλίνουσα περιοχή, με αποτέλεσμα να δύναται να παραλάβει υδροδυναμικό φορτίο, δηλαδή να λιπανθεί υδροδυναμικά, υπό την προϋπόθεση ότι του παρέχεται η απαιτούμενη ποσότητα λιπαντικού και κατά τις δύο φάσεις κίνησης (ανόδου και καθόδου), από το Άνω Νεκρό Σημείο (ΑΝΣ) προς το Κάτω Νεκρό Σημείο (ΚΝΣ) και αντίστροφα. Κατά τους χρόνους εξαγωγής και εισαγωγής μίγματος στον κύλινδρο ΜΕΚ, ο δακτύλιος αυτός λόγω της μορφής του και του μειωμένου φορτίου επαφής παρουσιάζει, αν και μερικά λιπαινόμενος, τις περισσότερες πιθανότητες υδροδυναμικής λίπανσης.

Ειδικότερα σ' ότι αφορά σε κινητήρες βενζίνης, κυβισμού από 277-541 cm³/κύλινδρο, οι δακτύλιοι της φωτιάς έχουν πλάτος της τάξης του mm (πχ 1.75 mm), με τάση μείωσής του, ώστε να μειωθεί και το επιπρόσθετο φορτίο λόγω πίεσης αερίων. Η κατατομή (profil) τους, κατασκευαστικά επιτυγχάνεται με αρχικές ακτίνες καμπυλότητας της τάξης μερικών δεκάδων χιλιοστών (πχ 20-50 mm). Η καμπυλότητα αυτή αυξάνεται με την φθορά κατά τον χρόνο λειτουργίας και έχει σαν αποτέλεσμα η φθαρμένη διατομή του δακτυλίου να εμφανίζεται τελικά περίπου επίπεδη. Η ελαστική πίεση που οι κατασκευαστές συνήθως προτείνουν κυμαίνεται από 0.50 έως 2.0 10⁵ Pa. Θεωρητικό προσομοιωτικό μοντέλο δίδει για περιστροφή στροφαλοφόρου από 1500–6000 rpm και λιπαντικό ιξώδους 7.4 mPa.s (15W40-130° C), μέγιστο πάχος απαιτούμενης λιπαντικής μεμβράνης κατά την παλινδρόμηση από 4-9 μm σε συνθήκες επαρκούς λίπανσης. Αντίστοιχες τιμές για κινητήρα Diesel, το

έμβολο του οποίου έχει 4 δακτυλίους δίνονται για αρχικό στάδιο φθοράς, 3-6 μm , για μεμονωμένο δακτύλιο, ενώ η εκτίμηση του πάχους μεμβράνης λιπαντικού κατά την λειτουργία συστοιχίας πέφτει στην τιμή 0.25 – 0.80 μm και ακόμη περισσότερο με τη φθορά μετά από 120 – 630 h λειτουργίας.

Ο δακτύλιος της φωτιάς γενικά λόγω της κατατομής του δύναται να λειτουργεί ακόμη και όταν το έμβολο περιστρέφεται ελαφρά κατά την διαδρομή του. Η απουσία ακμών απομακρύνει την πιθανότητα διακοπής της λιπαντικής μεμβράνης και η μικρή επιφάνεια επαφής του με τον κύλινδρο λόγω της σχεδόν γραμμικής επαφής, μειώνει την περίοδο «του στρωσίματος» του κινητήρα. Δακτύλιοι της φωτιάς κυκλοφορούν στο εμπόριο κατασκευασμένοι από χυτοσίδηρο σφαιροειδούς γραφίτη ή/και επενδυμένοι περιφερειακά με μολυβδαίνιο, φωσφατωμένοι ή ακόμη και επιχρωμιωμένοι.

Για τους επιχρωμιωμένους βαρελοειδούς κατατομής, ενδείκνυται κατ' αρχάς η δημιουργία εσωτερικού στρώματος από σκληρό χρώμιο, πάχους 60-90 μm , ενώ ένα εξωτερικό στρώμα πάχους 40-60 μm από πορώδες χρώμιο δίνει το τελικό επιθυμητό προφίλ στον δακτύλιο. Έντονες κοιλάδες που παρατηρούνται στην μικροτοπογραφία είναι πόροι/συνέπειες της κατεργασίας του.

Ο **δεύτερος δακτύλιος** συνήθως είναι κόλouro-κωνικής φυσιογνωμίας με διατομή ορθογωνίου τραπεζίου, πλάτους περίπου 2 mm, με κωνικότητα που χαρακτηρίζεται από περίπου 35 μm ακτινική απόσταση ακμών. Η αιχμηρή περιοχή του είναι τοποθετημένη-στραμμένη προς το κάτω νεκρό σημείο με στόχο την αποφυγή υδροδυναμικού σφήνα κατά την κάθοδο του εμβόλου και παράλληλα την επίτευξη στράγγισης του λιπαντικού. Η ελαστική πίεση που ενδείκνυται είναι περίπου $2.0 \cdot 10^5$ Pa. Θεωρητικό προσομοιωτικό μοντέλο [93-96] δίδει για περιστροφή στροφαλοφόρου από 1500 – 4500 rpm και λιπαντικό ιξώδους 7.4 mPas (15W40-130° C), μέγιστο πάχος απαιτούμενης λιπαντικής μεμβράνης κατά την παλινδρόμηση για την άνοδο από 8-13 μm . και για την κάθοδο σταθερό πάχος 2 μm .

Αντίστοιχες τιμές [106] για κινητήρα Diesel, το έμβολο του οποίου έχει 4 δακτυλίους δίνονται για αρχικό στάδιο φθοράς, κατά την άνοδο 6.5 μm και για την κάθοδο (σταθερό πάχος) 1 μm για μεμονωμένο δακτύλιο, ενώ η εκτίμηση του πάχους μεμβράνης λιπαντικού κατά την λειτουργία συστοιχίας πέφτει στην τιμή 0.80 μm και ακόμη περισσότερο με τη φθορά μετά από 120 – 630 h λειτουργίας.

Δακτύλιοι αυτού του τύπου γενικά κατασκευάζονται από χυτοσίδηρο ή χάλυβα, υφίστανται επιφανειακή κατεργασία ή επικάλυψη περιφερειακά και σπανιότερα στην επίπεδες επιφάνειές τους για αύξηση της αντίστασής τους σε φθορά. Ο δακτύλιος στεγάνωσης θεωρείται επίσης ότι μειώνει την περίοδο στρωσίματος λόγω της εξ

αρχής γραμμικής του επαφής με τον κύλινδρο και ότι δρα συμπληρωματικά με τον τρίτο δακτύλιο (του λαδιού) στον έλεγχο κατανάλωσης λιπαντικού.

Ο **τρίτος δακτύλιος** είναι σχεδόν αδύνατο να λειτουργήσει κάτω από συνθήκες υδροδυναμικής λίπανσης, εκτός των περιπτώσεων παρέκκλισης από την ονομαστική του γεωμετρία επαφής λόγω φθοράς ή παραμορφώσεων. Γενικά, η υψηλή τιμή της πίεσης επαφής του δεν είναι δυνατό να αντισταθμισθεί από υδροδυναμικό μηχανισμό ώστε να αποκολληθεί ο δακτύλιος αυτός από τον κύλινδρο, αν και είναι ο μόνος που του παρέχεται λιπαντικό σε αφθονία. Συνήθως εμφανίζει δύο χείλη πλάτους δεκάτων χιλιοστού πχ 0.2-0.4mm, συνολικό πλάτος περίπου 4.5mm και ελαστική πίεση 7.8×10^5 Pa. Θεωρητικό προσομοιωτικό μοντέλο [93-96] δίδει για περιστροφή στροφαλοφόρου από 1500 – 6000 rpm και λιπαντικό ιξώδους 7.4 mPas (15W40-130° C), μέγιστο πάχος απαιτούμενης λιπαντικής μεμβράνης κατά την παλινδρόμηση της τάξης των 3 μ m. Η μεγάλη τιμή της ελαστικής πίεσης στον 3° δακτύλιο επιτυγχάνεται με εσωτερικό ελατηριωτό εκτατήρα. Τέτοιου τύπου εκτατήρες χρησιμοποιούνται και για τους άλλους δακτυλίους σε περιπτώσεις πολύ φθαρμένων κυλίνδρων (έως 0.50mm φθορά στην διάμετρό τους) προς αποφυγή ανεπιθύμητων συμβάντων (διαρροή λιπαντικού, υπερβολική κατανάλωση λιπαντικού, αύξηση blow by) χωρίς να είναι και η βέλτιστη ενδεδειγμένη λύση από την άποψη τριβής-φθοράς.

Κατά την τελευταία δεκαπενταετία στο τμήμα μηχανολόγων μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας αναπτύσσεται και βελτιώνεται σε συνεχή βάση και σε μεγάλο βαθμό μέσα από εκπόνηση διπλωματικών εργασιών ο υπολογιστικός κώδικας oilfilm. Πρόκειται για λογισμικό που χρησιμοποιείται για την θεωρητική προσομοίωση της συμπεριφοράς κυρίως από τριβολογική άποψη μεμονωμένου δακτυλίου εμβολοφόρου Μ.Ε.Κ. κάτω από συνθήκες μικτής λίπανσης. Προηγούμενες διπλωματικές εργασίες εκπονήθηκαν με στόχο:

- 1)Τη θεωρητική προσομοίωση της συμπεριφοράς δακτυλίου διαφορετικών προφίλ σε συνθήκες λειτουργίας πραγματικού κινητήρα αλλά σε κατάσταση motoring (ανοιχτός κύλινδρος).
- 2)Τη θεωρητική προσομοίωση αντίστοιχου δακτυλίου αλλά σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας υπό πλήρες φορτίο.
- 3)Την πρόβλεψη- χαρτογράφηση συμπεριφοράς δακτυλίων συγκεκριμένης γεωμετρίας σε συνθήκες λειτουργίας παρασκευασθέντος πειραματικού προσομοιωτή
- 4)Την ανάπτυξη μεθόδου ταχείας προσέγγισης των θεωρητικών λύσεων μέσω πολυωνυμικών προσεγγίσεων.
- 5)Την ανάπτυξη μεθόδου ταχείας προσέγγισης θεωρητικών λύσεων μέσω καμπυλών τύπου Stribeck .
- 6)Την θεωρητική προσομοίωση αντίστοιχου δακτυλίου με παράμετρο την μεταβολή της γεωμετρίας του κυλίνδρου μέσα στον χρόνο.

7) Αντίστοιχη με την προαναφερθείσα προσομοίωση αλλά με πρόσθετη την μεταβολή της μακρό γεωμετρίας του πρώτου δακτυλίου μέσα στο πεδίο του χρόνου.

8) Την περιγραφή της μακρό γεωμετρίας της τραχείας επιφάνειας του κυλίνδρου με βάση το στατιστικό σύστημα Fischer-Pearson καθώς και

9) Την επίδραση των ρεαλιστικών κατανομών υψομέτρων της τραχείας επιφάνειας πάνω στις τιμές διορθωτικών συντελεστών λαμβάνονται υπόψη στον κώδικα.

Θεωρώντας ότι έχει επιτευχθεί σε μεγάλο βαθμό και σε βάθος η διερεύνηση της προαναφερθείσας θεωρητικής προσομοίωσης με εργαλείο τον κώδικα oilfilm στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ώριμη και κάτω από κριτικό πνεύμα πρόταση βελτίωσης του λογισμικού έτσι ώστε να αντιμετωπίζει αυξημένες απαιτήσεις και να καταστεί συγχρόνως φιλικότερος προς τον χρήστη πληρέστερος και ταχύτερος.

Κάτι τέτοιο κατέστη δυνατό έπειτα από προσεκτική μελέτη του κώδικα , κατανόηση και επεξεργασία . Οι αλλαγές που έχουν γίνει στον κώδικα επικεντρώνονται σε τρεις τομείς:

1^{ov}) Έγινε αλλαγή στο πρόγραμμα που χρησιμοποιείται για την λειτουργία του κώδικα με στόχο τον εκσυγχρονισμό καθώς και την καλύτερη λειτουργία . Ο αρχικός κώδικας ήταν γραμμένος σε γλώσσα προγραμματισμού fortran και πλέον αποδίδεται σε κώδικα της γλώσσας προγραμματισμού matlab. Αυτό έχει ως συνέπεια τον αμεσότερο έλεγχο της ροής του προγράμματος , από τον οποίο εντοπίστηκαν και κάποια λάθη του προηγούμενου λογισμικού. Ο αμεσότερος έλεγχος έγκειται στο ότι στην επιφάνεια εργασίας της γλώσσας fortran δεν δίδεται η δυνατότητα άμεσου ελέγχου των δεδομένων , των ενδιάμεσων και τελικών αποτελεσμάτων του προγράμματος χωρίς την χρήση του debugging , εν όσο στην επιφάνεια εργασίας της γλώσσας matlab παραθέτονται αυτόματα όλα τα δεδομένα καθώς και τα ενδιάμεσα και τελικά αποτελέσματα του υπολογιστικού κώδικα , χωρίς την χρήση του debugging .

2^{ov}) Χάριν της ευκολίας που δίνει το πρόγραμμα της matlab με τον αμεσότερο έλεγχο των δεδομένων , των ενδιάμεσων και των τελικών αποτελεσμάτων , μας δόθηκε η ευκαιρία για τον έλεγχο των επαναληπτικών μεθόδων που χρησιμοποιεί ο κώδικας . Ο έλεγχος που έγινε αφορά στην ταχύτητα σύγκλισης , ουσιαστικά στον χρόνο που απαιτείται για να 'τρέξει' ο κώδικας , καθώς και στην μείωση όσο το δυνατό περισσότερο του απόλυτου αριθμητικού σφάλματος .

3^{ov}) Τέλος το πρόγραμμα της matlab προσφέρει και καλύτερη επικοινωνία με υπολογιστικά φύλλα τύπου Excel τα οποία είναι φιλικότερα προς τον χρήστη και ευκολότερα στην ανάγνωση . Η επικοινωνία που χρησιμοποιείται με το Excel στον κώδικα έχει να κάνει με τα δεδομένα της προσομοίωσης καθώς και με τα αποτελέσματα του κώδικα . Στα δεδομένα ,πλέον η είσοδος τους γίνεται σε φύλλο Excel και όχι απευθείας στον κώδικα ,όπως στην fortran ,το οποίο εν συνεχεία διαβάζει η matlab και με αυτό τον τρόπο μειώνεται σημαντικά ,σχεδόν μηδενίζεται πιθανότητα αλλαγής δομικών στοιχείων του κώδικα . Στα αποτελέσματα, γίνεται άμεση η εγγραφή τους σε ένα φύλλο του Excel και η δημιουργία διαγραμμάτων , σε αντίθεση με το πρόγραμμα της fortran όπου έπρεπε να γίνει χειροκίνητα η όλη

διαδικασία με αποτέλεσμα την αύξηση της πιθανότητας ανθρώπινου λάθους καθώς και του χρόνου σχηματισμού διαγραμμάτων .

Η εκπονηθείσα διπλωματική εργασία ορίζεται σε τέσσερα κεφάλαια:

1^ο)δίνεται το θεωρητικό υπόβαθρο που χρησιμοποιήθηκε στον κώδικα καθώς και η μέθοδος προσαρμογής του στο λογισμικό.

2^ο)γίνεται ανάλυση του κώδικα για βαθύτερη κατανόηση της λειτουργίας του και της πρακτικής σημασίας των αλλαγών.

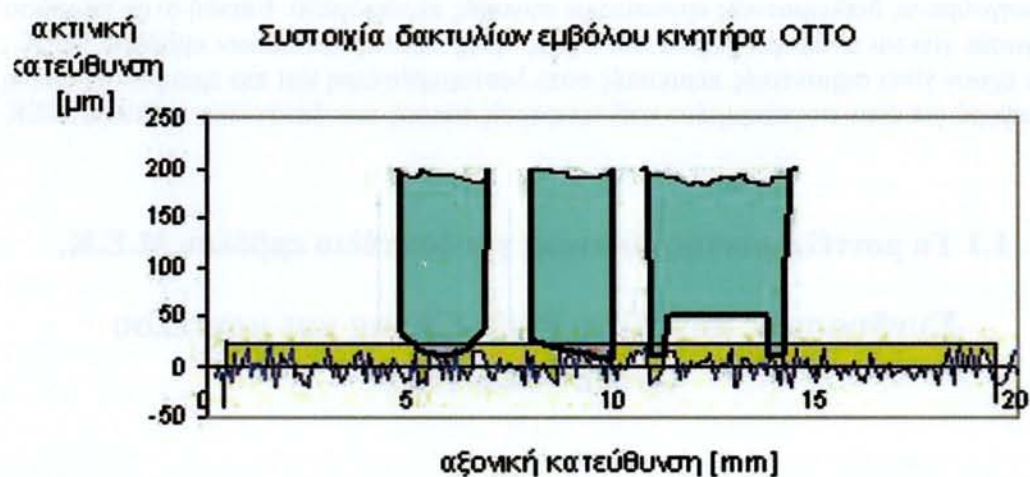
3^ο)δίνονται επιμέρους αποτελέσματα της θεωρητικής προσομοίωσης με τον βελτιωμένο κώδικα σε σύγκριση με αντίστοιχα αποτελέσματα πριν την βελτίωση.

4ο) γίνεται αναφορά στα συμπεράσματα στις προτάσεις βελτίωσης και στις μελλοντικές προοπτικές .

Τέλος ακολουθούν βιβλιογραφία και παραρτήματα έτσι ώστε να ολοκληρωθεί με πληρότητα το έργο που υλοποιήσαμε.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή-Θεωρητικό Υπόβαθρο



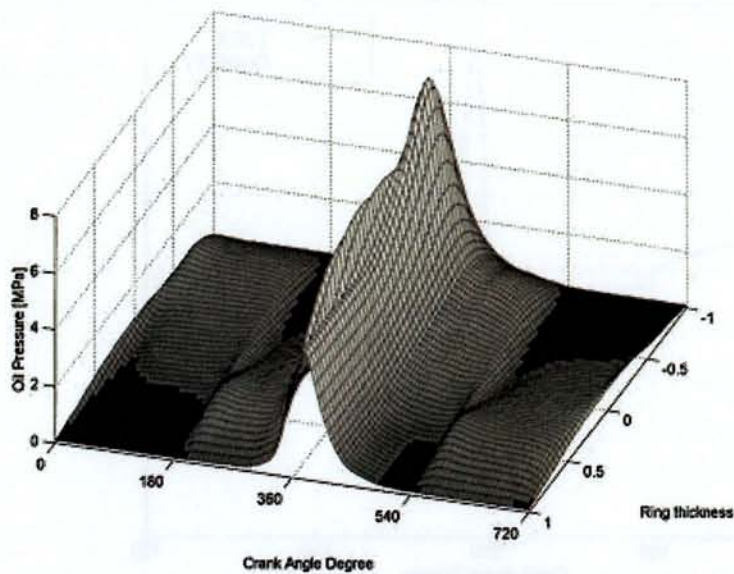
Τα τελευταία χρόνια στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας εκπονούνται διπλωματικές εργασίες που θεωρούνται κάθε μια συνέχεια της προηγούμενης με σκοπό την βαθύτερη και συνεχή ανάλυση της συμπεριφοράς μηχανικών υποσυστημάτων σε λειτουργία. Οι διπλωματικές εργασίες υποβοηθούν, κάθε μία με την βαρύτητα της, στην ανάπτυξη θεωρητικών και πειραματικών μοντέλων και στην συνεχή εξέλιξη τους. Στη συνέχεια στο παρών κεφάλαιο παρουσιάζονται στοιχεία από την βιβλιογραφία που σχετίζεται με την λειτουργία-λίπανση του τριβοσυστήματος έμβολο+δακτύλιος/κύλινδρος μηχανών εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ), μεγάλο μέρος της οποίας έχει χρησιμοποιηθεί σε βάση σε προηγούμενες διπλωματικές εργασίες με συναφές περιεχόμενο. Επειδή στην παρούσα εργασία γίνεται αναφορά γενικά και στους τρεις τύπους δακτυλίων εμβόλου ΜΕΚ, δεν έχουν γίνει σημαντικές περικοπές ούτε λεπτομερέστερη και πιο εμπεριστατωμένη αναφορά για έναν συγκεκριμένο από τους τρεις τύπους των δακτυλίων εμβόλου ΜΕΚ.

1.1 Τα μοντέλα μικτής λίπανσης για δακτύλιο εμβόλου Μ.Ε.Κ.

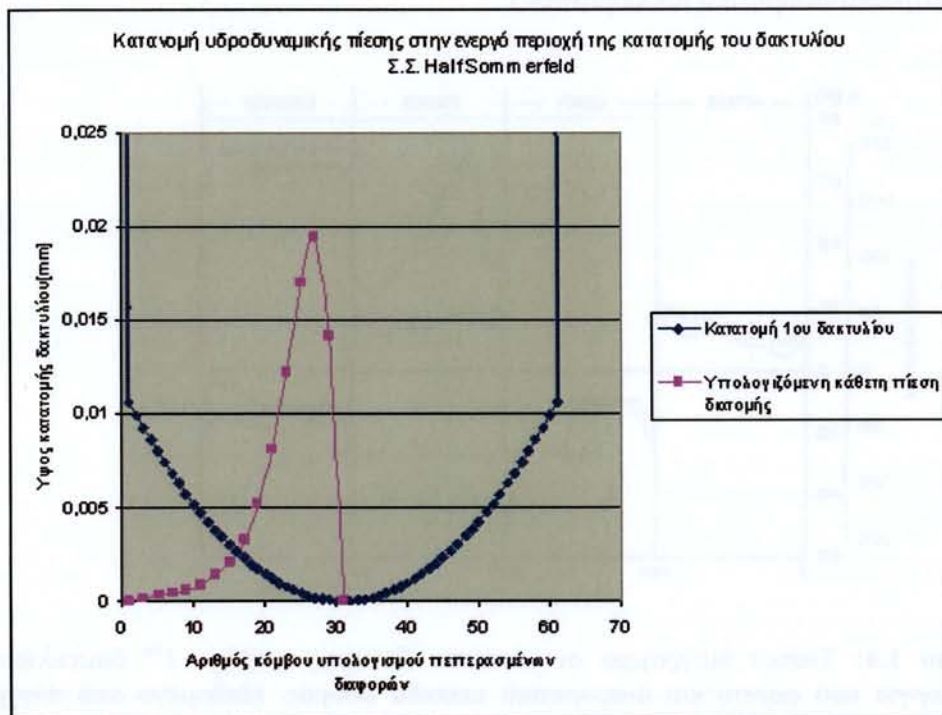
Συνδυασμός μοντέλου Patir-Cheng και μοντέλου Greenwood-Trip

Οι σύγχρονες μέθοδοι για την αντιμετώπιση της θεωρητικής προσέγγισης της τριβολογικής συμπεριφοράς των δακτυλίων εμβόλων έχουν ήδη εγκαταλείψει τις κλασικές μεθόδους περί πλήρους και υδροδυναμικής λίπανσης. Γενικά, αποδέχονται ένα είδος μικτής λίπανσης κυρίως στις περιοχές των νεκρών σημείων όπου η υδροδυναμική συνιστώσα της παραλαβής φορτίου ελαχιστοποιείται ενώ παράλληλα εμφανίζεται η συνιστώσα παραλαβής φορτίου από τους λοφίσκους των τραχειών επιφανειών οι οποίοι παραμορφώνονται υπό την επίδραση του φορτίου αυτού ελαστικά ή πλαστικά (ένα είδος μικρό-έλαστο-υδροδυναμικής συμπεριφοράς).

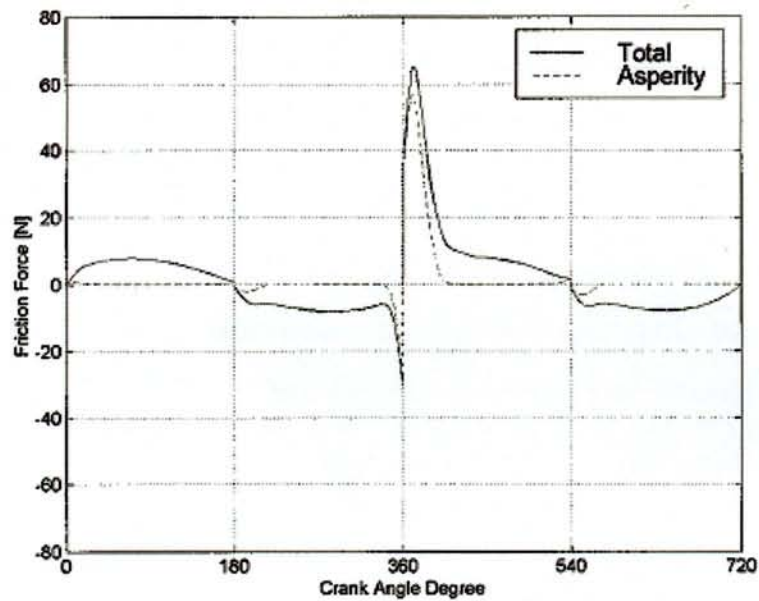
Επιπλέον στα μοντέλα αυτά λαμβάνεται υπόψη ο ισότροπος ή ανισότροπος χαρακτήρας των τραχειών επιφανειών με αποτέλεσμα την διόρθωση της εξίσωσης του Reynolds με χρήση παραμέτρων ροής (παροχής) του λιπαντικού. Τα μοντέλα αυτά θεωρούνται στην πιο απλή μορφή τους ισόθερμα. Προχωρημένα μοντέλα προσομοίωσης θεωρούνται σήμερα τα θερμό-μικρό-έλαστο υδροδυναμικά όπου εκτός των άλλων σε πρώτο βαθμό επιβάλλεται ενεργειακό-θερμικό ισοζύγιο, και αφετέρου γίνεται και υπολογισμός του διαθέσιμου λιπαντικού που απομένει για να λιπάνει τους δακτυλίους που έπονται μέσα σ' ένα πλήρες σύστημα εμβόλου δακτυλίων.



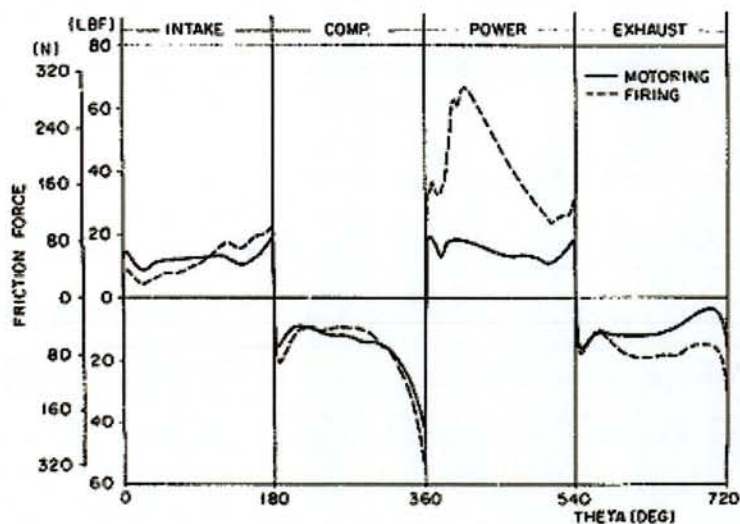
Σχήμα 1.1: Κατανομή υδροδυναμικών πιέσεων κατά την κίνηση - δεδομένο από βιβλιογραφία.



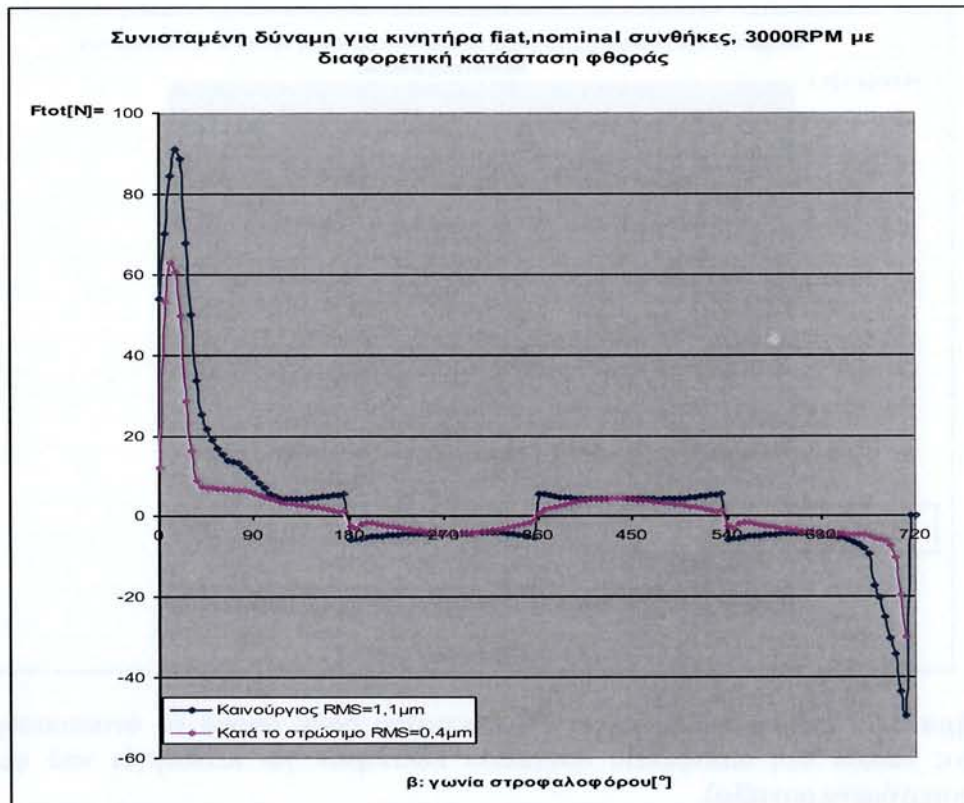
Σχήμα 1.2: Τυπική κατατομή 1^{ου} δακτυλίου με την κατανομή υδροδυναμικών πιέσεων κατά την κίνηση προς τα αριστερά-από κάτω νεκρό σημείο προς άνω νεκρό σημείο(προτεινόμενο μοντέλο).



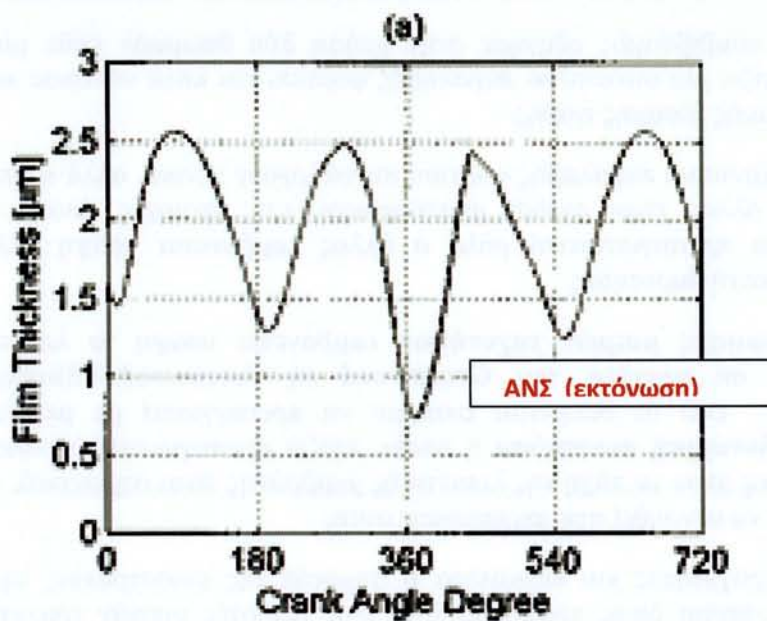
Σχήμα 1.3: Τυπικό διάγραμμα συνιστωσών δύναμης τριβής 1^{ου} δακτυλίου για λειτουργία υπό φορτίο και διαφορετικά επίπεδα φθοράς. (δεδομένο από σύγχρονη βιβλιογραφία-θεωρητική προσομοίωση)



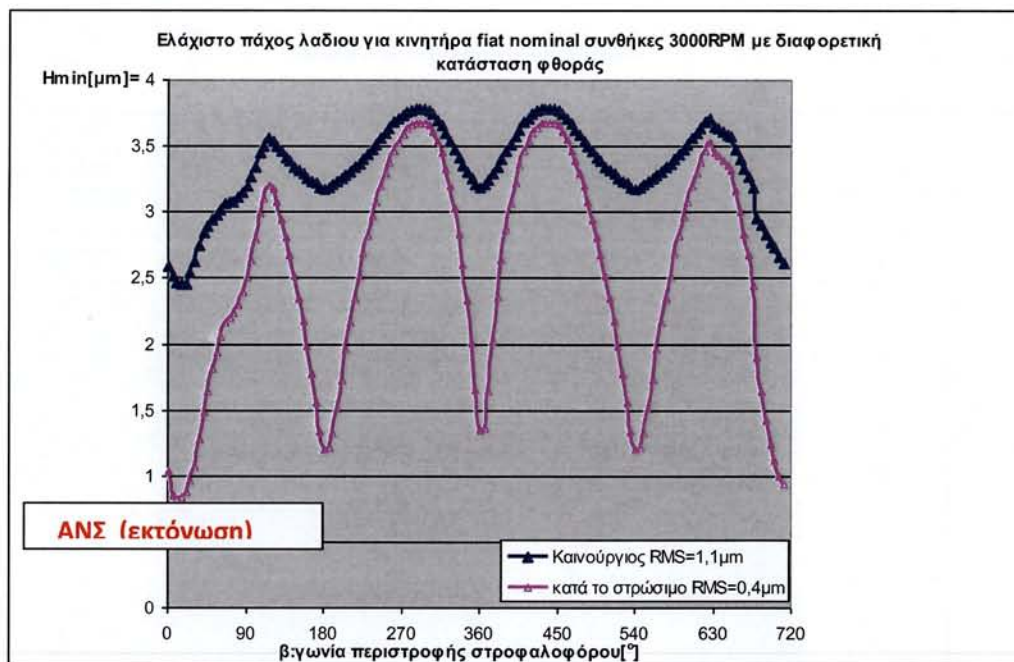
Σχήμα 1.4: Τυπικό διάγραμμα συνιστωσών δύναμης τριβής 1^{ου} δακτυλίου για λειτουργία υπό φορτίο και διαφορετικά επίπεδα φθοράς. (δεδομένο από σύγχρονη βιβλιογραφία-πειραματική προσομοίωση)



Σχήμα 1.5: Τυπικό διάγραμμα συνιστωσών δύναμης τριβής 1^{ου} δακτυλίου για λειτουργία υπό φορτίο και διαφορετικά επίπεδα φθοράς. (Προτεινόμενο μοντέλο)



Σχήμα 1.6: Τυπική συμπεριφορά 1^{ου} δακτυλίου όσον αφορά το αναπτυσσόμενο πάχος λαδιού στη διεπιφάνεια δακτυλίου κυλίνδρων . (Δεδομένο από βιβλιογραφία)



Σχήμα 1.7: Τυπική συμπεριφορά 1^{ου} δακτυλίου όσον αφορά το αναπτυσσόμενο πάχος λαδιού στη διεπιφάνεια δακτυλίου κυλίνδρων για λειτουργία υπό φορτίο (Προτεινόμενο μοντέλο).

Επειδή η υλοποίηση ενός υπολογιστικού κώδικα με το βάθος των προαναφερθέντων υπερβαίνει κατά πολύ τα όρια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θεωρήθηκε σκόπιμο να αναπτυχθεί καταρχήν ένα δραστικό μοντέλο με μεγάλη ακρίβεια στους υπολογισμούς και λεπτομερή περιγραφή της γεωμετρίας με χρήση πυκνού πλέγματος.

Έτσι ο τεχνικός συμβιβασμός οδήγησε στην χρήση **δύο θεωριών** κάθε μία των οποίων αντιμετωπίζει μία συνιστώσα παραλαβής φορτίου και κατά συνέπεια και μία συνιστώσα της ολικής δύναμης τριβής.

Επειδή οι δύο μηχανισμοί παραλαβής φορτίου συνυπάρχουν γενικά, αλλά η απουσία του ενός ή του άλλου είναι σχεδόν αναπόφευκτη, στις περιοχές, όπου ο ένας μηχανισμός παίζει πρωταγωνιστικό ρόλο ο άλλος λαμβάνεται υπόψη αλλά με μικρότερο συντελεστή βαρύτητας.

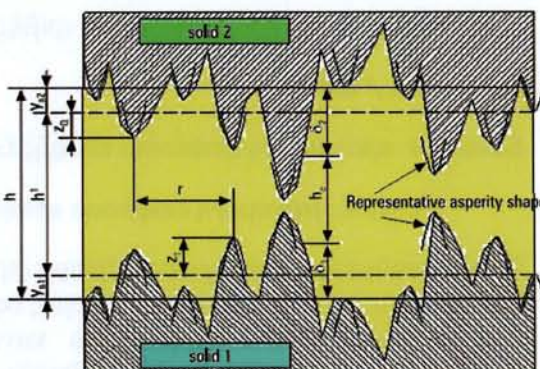
Δηλαδή, **στις περιοχές μικρών ταχυτήτων** λαμβάνεται υπόψη το λεπτομερές μοντέλο γνωστό σα **μοντέλο του Greenwood** (ή Greenwood-Williamson ή Greenwood-Trip), ενώ δε θεωρείται σκόπιμο να προσεγγιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η **υδροδυναμική συνιστώσα** η οποία, παίζει πρωταγωνιστικό ρόλο **στις μεγάλες ταχύτητες** όπου τα πάχη της λιπαντικής μεμβράνης είναι σημαντικά, άρα η τραχύτητα μπορεί να αγνοηθεί στις περιπτώσεις αυτές.

Η σημασία της τραχύτητας και ειδικότερα η σημασία της ανισοτροπίας της που εσκεμμένα παραλείπεται όπως προαναφέρθηκε στις περιοχές μικρών ταχυτήτων, ερμηνεύεται στη συνέχεια (Σχήμα Π1.1, Π1.2).

Η απλουστευτική υπόθεση στο μοντέλο που υιοθετήθηκε ερμηνεύεται με την αρχική ανισοτροπία της τραχύτητας του κυλίνδρου η οποία είναι εγκάρσια (transversal $1/9 < \gamma < 1/3$) και δεν παρουσιάζει ουσιώδεις διαφορές για τις τιμές αυτές. Ενδεχομένως, σε άλλης μορφής επιφάνειες με ανισοτροπία διαμήκη (longitudinal $1 < \gamma < 9$) οι διαφορές αυτές είναι σημαντικές και κρίνεται απαραίτητο να καταγραφούν με τη χρήση πληρέστερης προσέγγισης (Σχήμα 1.10).

Ο υπολογιστικός κώδικας σε περίπτωση λείων επιφανειών απαιτεί σα δεδομένο μία ελάχιστη αλλά μη μηδενική τιμή της τραχύτητας (τυπική απόκλιση της κατανομής των υψομέτρων των κορυφών των λοφίσκων), ενώ στη γενική περίπτωση απαιτεί την γνώση επιπλέον των παρακάτω χαρακτηριστικών:

- **Πυκνότητα λοφίσκων** (αριθμός λοφίσκων ανά μονάδα επιφάνειας)
- **Μέση ακτίνα καμπυλότητας του πληθυσμού των κορυφών των λοφίσκων.**



Θεωρείται σημαντικό να αναφερθεί ότι τελικά στην διαδικασία υπολογισμού των απωλειών λόγω τριβών στο υπό μελέτη σύστημα σημαντικό ρόλο παίζει η ισχύς τριβής η οποία ελαχιστοποιείται στις περιοχές των άνω και κάτω νεκρών σημείων, όπου μηδενίζεται η τραχύτητα. Άρα για τον υπολογισμό της παραμέτρου P_{mf} (μέση πίεση που αντιστοιχεί στις μηχανικές απώλειες) η ακρίβεια με βάση την υδροδυναμική συνιστώσα θεωρείται ικανοποιητική.

Αντίθετα, στις περιοχές των **νεκρών σημείων** το μοντέλο φιλοδοξεί να ερμηνεύσει το μηχανισμό της φθοράς. Σημειωτέον, ότι ο κώδικας που υποστηρίζει την παρούσα εργασία είναι εφαρμόσιμος σε περίπτωση ανοιχτού κυλίνδρου αλλά και σε περίπτωση προσομοίωσης ρεαλιστικής λειτουργίας με διακεκριμένους τους τέσσερις χρόνους λειτουργίας τετράχρονης ΜΕΚ εφαρμόζεται σε διαφορετικές γεωμετρίες κινητήρων και κατατομών δακτυλίων (κυρτών-κολουροκωνικών- επίπεδων), καθώς και σε διαφορετικά στάδια φθοράς των διεπιφανειών (χωρίς ώρες λειτουργίας, μετά το στρώσιμο και φθαρμένες).

Στο **μοντέλο του Greenwood** λαμβάνεται υπόψη συντελεστής τριβής τάξεως μεγέθους 0,08 που αφορά στο μηχανισμό τριβής των κορυφών των λοφίσκων. Η τιμή αυτή ευελπιστούμε ότι θα καθοριστεί και πειραματικά στον πειραματικό προσομοιωτή. Η δεύτερη παράμετρος που αντιστοιχεί στην διατμητική δύναμη που «απαιτείται» για την υπερνίκηση της αντίστασης της λεγόμενης επιφανειακής μονομοριακής μεμβράνης τ_0 στο μοντέλο μας, θεωρείται αμελητέα.

$$W_{tot} = W_{tota} + W_{toth}W_{tot} = \text{Ολικό φορτίο επαφής}$$

$$W_{tota} = \text{Φορτίο που παραλαμβάνεται από την τραχύτητα}$$

$W_{tot h}$ = Υδροδυναμικό φορτίο

$$F_{tot} = F_{tota} + F_{toth}$$

F_{tot} = ολική δύναμη τριβής

F_{tota} = Συνιστώσα της τριβής που οφείλεται στην παραμόρφωση της τραχύτητας

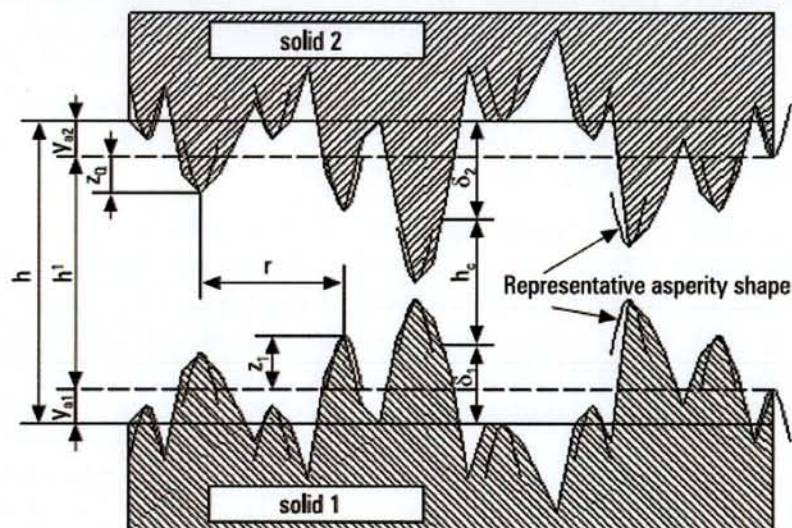
F_{toth} = υδροδυναμική συνιστώσα της τριβής

$$F_{tota} = aW_{tota} + \tau_0 * A$$

Όπου: A : πραγματική επιφάνεια επαφής Greenwood

$$A = \pi DL: \text{φαινόμενη επιφάνεια επαφής}$$

Τα προηγούμενα, όπως προαναφέρθηκε προτείνονται από την ομάδα του Greenwood και αφορούν σε συμμετρικές κατανομές υψομέτρων των κορυφών των λοφίσκων που στη γενικότητα τους λαμβάνονται κανονικές (Gauss). Στις περιπτώσεις αυτές συνάρτηση του μεγέθους που καθορίζει το διαχωρισμό των μέσων τιμών του υψομέτρου των λοφίσκων των δύο τραχειών επιφανειών είναι αφενός το φορτίο που παραλαμβάνεται από τις ελαστικά παραμορφωμένες μικρογεωμετρικές ανωμαλίες των επιφανειών και αφετέρου η πραγματική επιφάνεια επαφής καθώς και ο αριθμός των επαφών ανά μονάδα επιφάνειας.



———— Μέσος όρος πληθυσμού σημείων
 - - - - - Μέσος όρος πληθυσμού κορυφών λοφίσκων

Σχήμα 1.8: Σχηματική αναπαράσταση επαφής τραχειών επιφανειών παρουσία λιπαντικού μέσου.

Αυτό που αναφέρεται στη θεωρία Greenwood σαν διαχωρισμός των επιφανειών (surface separation-d) θα μπορούσε να ισοδυναμεί με το αντίστοιχο μέγεθος του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης αν οι δύο πληθυσμοί υψομέτρων δηλαδή ο πληθυσμός υψομέτρων όλων των σημείων της κατατομής της επιφάνειας (σ_{po} :τυπική απόκλιση) και το υποσύνολο του δηλαδή ο πληθυσμός των υψομέτρων των κορυφών των λοφίσκων(σ_p :τυπική απόκλιση)εμφανίζουν τον ίδιο μέσο όρο.

Σε αντίθετη περίπτωση όπως συμβαίνει στην πράξη υπάρχει διαφορά μη μηδενική των μέσων όρων των δύο πληθυσμών ($y_o > 0$) με την τιμή του μέσου όρου των πληθυσμού των pick μεγαλύτερη.

Έτσι το d γίνεται :

$$d = h - y_o \text{ ή } (d(i,j) = h(i,j) + y_o)$$

Συνεπώς, λαμβάνουμε αντίστοιχα για το φορτίο $W(d)$ την πραγματική επιφάνεια επαφής $A(d)$ και τον πραγματικό αριθμό λοφίσκων σε επαφή $N(d)$:

$$W(d) = \pi(\eta\beta\sigma)^2 A[F_{5/2}(d/\sigma)](1/15)\sqrt{2}E_{cpm}\sqrt{\sigma/\beta}$$

$$A(d) = \pi^2(\eta\beta\sigma)^2 A[F_2(d/\sigma)]$$

$$N(d) = 4\pi(\eta\beta\sigma)A\eta[F_1(d/\sigma)]$$

Εννοείται ότι σε περίπτωση διαφοροποίησης των τιμών σ_{po} και σ_{pi} τότε στους παραπάνω τύπους όπου $\sigma = \sigma_{pi}$

Όπου $F_n(U) = \int_U^\infty \int_0^\infty (s - U^n \Phi_s) ds$ όπου Φ_s η κανονικοποιημένη κατανομή, $s = d/\sigma$

Οι συναρτήσεις που λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό του $F_{5/2}$ και F_2 προτείνεται να παίρνουν τις ακόλουθες τιμές.

$$F_2(H) = \begin{cases} d_1 e^{\left(d_2 \log(H^* - H) + d_3 (\log(H^* - H))^2\right)}, & H \leq 3,5 \\ d_1^H (H^* - H)^{d_2^H}, & H^* \geq H \geq 3,5 \\ 0, & H \geq H^* \end{cases}$$

$$F_{\frac{5}{2}}(H) = \begin{cases} f_1 e^{\left(f_2 \log(H^* - H) + f_3 (\log(H^* - H))^2 \right)}, & H \leq 3,5 \\ f_1^H (H^* - H)^{f_2^H}, & H^* \geq H \geq 3,5 \\ 0, & H \geq H^* \end{cases}$$

Όπου: $H^* = 4, d_1 = 1.705 \times 10^{-4}, d_2 = 4.05419, d_3 = 1.37025, d_1^H = 8.8123 \times 10^{-5}$
 $d_2^H = 2.1523, f_1 = 2.1339 \times 10^{-4}, f_2 = 3.804467, f_3 = 1.341516, f_1^H = 1.1201 \times 10^{-4}$
 $f_1^H = 1.9447$

Οι συναρτήσεις $F_{5/2}$ και F_2 στο πεδίο ορισμού τους λαμβάνουν διαφορετικές μορφές σε τρεις διακριτές περιοχές :

A) για $d/\sigma \leq 3,5$

B) για $d/\sigma \leq 4$ και $\geq 3,5$

Γ) για $d/\sigma \geq 4$

Η βασικότερη των υποθέσεων στην περίπτωση της θεωρητικής προσομοίωσης συνδέεται με την κυλινδρική συμμετρία που αποδεχόμαστε ότι χαρακτηρίζει το υπό μελέτη σύστημα. Δηλαδή σε πρώτη προσέγγιση δεχόμαστε ότι το διάκενο που εμφανίζει ο κάθε δακτύλιος είναι αμελητέου μεγέθους και δεν επηρεάζει τη λειτουργία του δακτυλίου, υπόθεση που δε θεωρείται αρκούντως ρεαλιστική.

Ο κώδικας όμως μπορεί να δεχθεί μια βελτίωση-συμπλήρωση έτσι ώστε στο μέλλον η παρουσία του διακένου να ληφθεί υπόψη ώστε να είναι δυνατή η μελέτη συμπεριφοράς κάθε δακτυλίου, είτε κατά τη λειτουργία εν κενώ, είτε κατά τη λειτουργία με φορτίο.

Από τη μελέτη της βιβλιογραφίας εξάγεται το συμπέρασμα ότι:

A) Δεν μπορούμε να υποστηρίξουμε ότι υπάρχει βέλτιστη μέθοδος για την αξιολόγηση-αποτίμηση και πλήρη καθορισμό των τριβών στο σύστημα εμβόλου δακτυλίων.

B) Κάθε μέθοδος είναι σε μεγάλο βαθμό σχετική με τον αντίστοιχο κινητήρα.

Γ) Εξαρτάται από μία ομάδα παραμέτρων που δεν έχουν ακόμη μέχρι σήμερα πλήρως καθοριστεί και μελετηθεί.

Συνήθως, θεωρούμε ότι στη γενική ανάλυση του προβλήματος των απωλειών λόγω τριβής, εμφανίζονται 6 βασικοί άξονες και οι επιδράσεις τους. Ειδικότερα

αναφέρουμε τη επίδραση του λειτουργικού περιβάλλοντος, των λειτουργικών παραμέτρων του κινητήρα, παραμέτρων που σχετίζονται με το έμβολο το χιτώνιο και τους δακτυλίους καθώς και την επίδραση της εξέλιξης αυτών μέσα στο πεδίο του χρόνου.

1.2 Το θεωρητικό Μοντέλο

1.2.1 Σύγκριση με την βιβλιογραφία και υποθέσεις επίλυσης

Η μοντελοποίηση της τριβής δακτυλίου-χιτωνίου, που παρουσιάζεται στη συνέχεια όπως προαναφέρθηκε, βασίζεται στην ιδέα του Rhode [67] που πρώτος πρότεινε το συνδυασμό δύο ανεπτυγμένων στοχαστικών θεωριών, που περιγράφουν τη λιπανόμενη επαφή μεταξύ δύο τραχειών τριβόμενων επιφανειών.

Στοχαστικές θεωρίες που εμφανίστηκαν σε μηχανισμό παραλαβής φορτίων, κατά την επαφή δύο στερεών και μάλιστα στην περίπτωση επιφανειών που εμφανίζουν ανισοτροπία τραχύτητας αναπτύχθηκαν από τον Christensen [12], [13].

Οι Patir και Cheng [60], [61] προτείνουν την μορφή μιας εξίσωσης του Reynolds εισάγοντας διορθωτικούς συντελεστές ροής οι οποίοι εξάγονται βάσει θεωρητικής προσομοίωσης. Αυτή η εξίσωση που ισχύει για λιπαντικό ισόθερμο και ασυμπίεστο, οδηγεί στον προσδιορισμό το πεδίου των πιέσεων λαμβάνοντας υπόψη τις συναρτήσεις κατανομής των υψομέτρων των σημείων καθεμιάς από τις δύο επιφάνειες, καθώς και τους αντίστοιχους χαρακτήρες, ως προς την ανισοτροπία των τραχυτήτων αυτών.

Παράλληλα ο Elrod [21] και μετέπειτα ο Trip [83] έχουν προτείνει μία θεωρία τοπικών μεταβολών προτείνοντας την εισαγωγή σφαλμάτων, που οφείλονται στην τραχύτητα των επιφανειών, μέσα από την εφαρμογή μετασχηματισμών Fourier. Εντούτοις, τα αποτελέσματα αυτών των θεωριών συγκλίνουν, όπως είναι προφανές, είτε για τιμές της τραχύτητας πολύ μικρές, είτε για σημαντικές τιμές του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης.

Στις περιπτώσεις που υπάρχουν επαφές έχει παρατηρηθεί μια αμελητέα διασπορά αποτελεσμάτων αναλόγως με τις συναρτήσεις κατανομής των υψομέτρων των σημείων των επιφανειών. Η διασπορά αυτή οφείλεται επίσης στον υπολογισμό συνθετικών τραχειών επιφανειών βάσει των οποίων υπολογίζονται οι υπόλοιποι συντελεστές. Στο θεωρητικό μοντέλο που ακολουθεί σαν πρώτο βήμα στην θεωρία Patir και Cheng θα λάβουμε υπόψη επιφάνειες που χαρακτηρίζονται από κανονική συνάρτηση (Gauss) και στη συνέχεια θα ληφθούν υπόψη επιφάνειες με ρεαλιστικότερες συναρτήσεις κατανομής που υπολογίζονται με βάση το μοντέλο Fisher-Pearson.

Όσον αφορά στη μελέτη του φορτίου που παραλαμβάνεται από τους παραμορφώσιμους λοφίσκους των δύο επιφανειών και εν συνεχεία τον υπολογισμό της αντίστοιχης συνιστώσας της τριβής θα γίνει χρήση της θεωρίας Greenwood και Trip [39] για επιφάνειες όχι κανονικές όπου οι λοφίσκοι είναι παραβολοειδή εκ περιστροφής, σταθερής ακτίνας καμπυλότητας, αλλά μεταβαλλόμενου ύψους και

φορτίζονται αξονικά με απουσία μεμονωμένων συγκρούσεων των λοφίσκων αυτών κατά τη σχετική κίνηση των επιφανειών αυτών.

Σημειώνεται ότι η θεωρία αυτή βασίζεται σε μια γενίκευση της επαφής τύπου Hertz, μεταξύ δυο παραβολοειδών εκ περιστροφής, λαμβάνοντας υπόψη κριτήρια που συνδέονται αυστηρά με τον πληθυσμό των υψομέτρων των κορυφών των λοφίσκων, της επιφανειακής πυκνότητάς τους, καθώς και την καμπυλότητα των κορυφών τους.

Οι τιμές αυτές θεωρούνται τυχαίες και εργοδεικτικές. Στα σημεία των επαφών η παροχή μηδενίζεται, ενώ παράλληλα θεωρούμε ότι στις περιοχές αυτές υπάρχει ένα επιφανειακό φιλμ λιπαντικού $\pi\chi$ του τύπου μονοστρωματικό, δηλαδή σε μοριακά μορφή. Το πάχος της μεμβράνης αυτής είναι της τάξεως nm και επιδέχεται μια διατμητική τάση της τάξης 10^6 έως 10^8 Pa. Σε περίπτωση απουσίας ακριβέστερων δεδομένων στο μαθηματικό μοντέλο είναι αποδεκτή μια συμπεριφορά, σύμφωνα με τη μελέτη [7] που αναφέρεται σε οργανικής υφής λιπαντικές μεμβράνες χαμηλού πάχους.

Υποθέσεις:

Στο συγκεκριμένο μοντέλο παίρνουμε τις παραδοχές.

1. Το μέσο είναι συνεχές.
2. Το λιπαντικό ακολουθεί το νόμο του Νεύτωνα ,παρουσιάζει ισότροπη συμπεριφορά και είναι ασυμπίεστο.
3. Η ροή είναι στρωτή (Υπόθεση που δικαιολογείται σχεδόν πάντοτε).
4. Δεν υπάρχει ολίσθηση στην επαφή λιπαντικού μεταλλικής επιφάνειας.
5. Το βάρος της ποσότητας του λιπαντικού είναι αμελητέο όπως επίσης και τα αδρανειακά φαινόμενα (Αυτή η υπόθεση δικαιολογείται από την πολύ μικρή τομή του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης).
6. Το λιπαντικό θεωρείται ισόθερμο και η θερμοκρασία του συμπίπτει με τη θερμοκρασία που μετράται κατά τη είσοδο του λιπαντικού στην είσοδο των εδράνων του στροφαλοφόρου.
7. Η υδροδυναμική πίεση δεν μεταβάλλεται κατά την ακτινική κατεύθυνση δηλαδή μέσα στο πάχος της λιπαντικής μεμβράνης.
8. Ο δακτύλιος λιπαίνεται πλήρως σε μία περιοχή σταθερού πλάτους κατά τη διαδρομή (γεγονός που δεν επαληθεύεται στην πράξη).
9. Υπάρχει παραλληλότητα μεταξύ των αξόνων του κυλίνδρου και του δακτυλίου και το διάκενο του δακτυλίου παραμένει σταθερό κατά τη διαδρομή.
10. Ο δακτύλιος είναι παραμορφώσιμος και ακολουθεί το πάχος της λιπαντικής μεμβράνης.

Επίδραση του λειτουργικού περιβάλλοντος.

Λίπανση δακτυλίου-χιτώνιου

Στο γενικό πρόβλημα της λίπανσης δύο γενικά τραχειών επιφανειών που βρίσκονται σε σχετική κίνηση διακρίνουμε δύο τρόπους λίπανσης:

1. Τη μη υδροδυναμική λίπανση που περιλαμβάνει την οριακή λίπανση και τη μεικτή λίπανση.
2. Την υδροδυναμική λίπανση που ονομάζεται και λίπανση με μεγάλο πάχος λιπαντικής μεμβράνης.

Κατά τις βέλτιστες συνθήκες λίπανσης η λιπαντική μεμβράνη διαχωρίζει σαφώς τις δύο τραχείες επιφάνειες και εμποδίζει κάθε επαφή μεταξύ των λοφίσκων της τραχύτητας.

Στην πράξη στο σύστημα δακτυλίου χιτώνιου παρατηρούμε ένα τύπο λίπανσης με έντονο μεταβατικό χαρακτήρα που τον χαρακτηρίζουμε σαν λίπανση μεικτού χαρακτήρα στην περίπτωση αυτή αν και το λιπαντικό υφίσταται πάντοτε, υπάρχει συγχρόνως επαφή μεταξύ των δυο στερεών σε περιπτώσεις χαμηλών γραμμικών ταχυτήτων, δηλαδή στις περιοχές πλησίον των νεκρών σημείων καθώς και σε περιπτώσεις ισχυρών φορτίων στη διεπιφάνεια κυρίως κατά τη φάση εκτόνωσης. Είναι αποδεκτό λοιπόν ότι το φορτίο στη διεπιφάνεια παραλαμβάνεται αφενός μεν από τη λιπαντική μεμβράνη αφετέρου από τους παραμορφώσιμους λοφίσκους των τραχυτήτων. Αυτοί οι δύο μηχανισμοί παραλαβής του φορτίου περιγράφονται από μαθηματικά μοντέλα ανεξάρτητα μεταξύ τους. Γίνεται λοιπόν αποδεκτό ότι τα δύο μοντέλα συνυπάρχουν με τη δυνατότητα απουσίας του ενός ή του άλλου. Η μετάβαση από το ένα μηχανισμό, παραλαβής φορτίου, στον άλλο, προφανώς γίνεται προοδευτικά προς τη μία ή την άλλη κατεύθυνση. Η συνολική δύναμη τριβής είναι συνισταμένη επίσης δύο ανεξάρτητων συνιστωσών που αναφέρονται αντίστοιχα στην υδροδυναμική συνιστώσα και στη συνιστώσα που συνδέεται με τη διάτμηση μίας επιφανειακής μεμβράνης που εμφανίζεται στις περιοχές επαφής των λοφίσκων.

Επίδραση της μικρογεωμετρίας των επιφανειών κυλίνδρου και δακτυλίου.

Κατά τη θεωρητική προσομοίωση της μικτής λίπανσης συστήματος δακτύλιος χιτώνιο συνηθίζεται αντί της μελέτης της επαφής μεταξύ δύο τραχειών επιφανειών να γίνεται προσέγγιση της μικρογεωμετρίας στην περιοχή της επιφάνειας με το ισοδύναμο μοντέλο μικτής λίπανσης μεταξύ λείας κινούμενης και τραχείας σταθεράς επιφάνειας. Στη συγκεκριμένη υπό μελέτη περίπτωση θεωρούμε κατά συνέπεια ότι ο δακτύλιος είναι λείος ενώ παράλληλα το χιτώνιο εμφανίζει ισοδύναμη τραχύτητα τέτοια ώστε $\sigma_i^2 = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)$. Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκαν και περιπτώσεις όπου και ο δακτύλιος αλλά και το χιτώνιο φέρουν τραχύτητα αλλά και περιπτώσεις όπου το χιτώνιο παραμένει λείο. Όπου σ_1 , σ_2 οι τυπικές αποκλίσεις των κατανομών για το χιτώνιο και τον δακτύλιο αντίστοιχα.

Πειραματικά αποτελέσματα δίνουν, για τα χαρακτηριστικά της μικρογεωμετρίας αυτής, ότι η μεταβολή τους σε τρία διαφορετικά στάδια φθοράς συμφωνεί με τα παρακάτω δεδομένα.

Στάδιο 1: Πριν από τη λειτουργία

$$\sigma_i = 1,1 \mu\text{m}$$

$$\eta\beta\sigma = 0,20$$

$$\sigma/\beta = 0,05$$

Στάδιο 2: Μετά από 10 ώρες λειτουργίας

$$\sigma_i = 0,40 \mu\text{m}$$

$$\eta\beta\sigma = 0,17$$

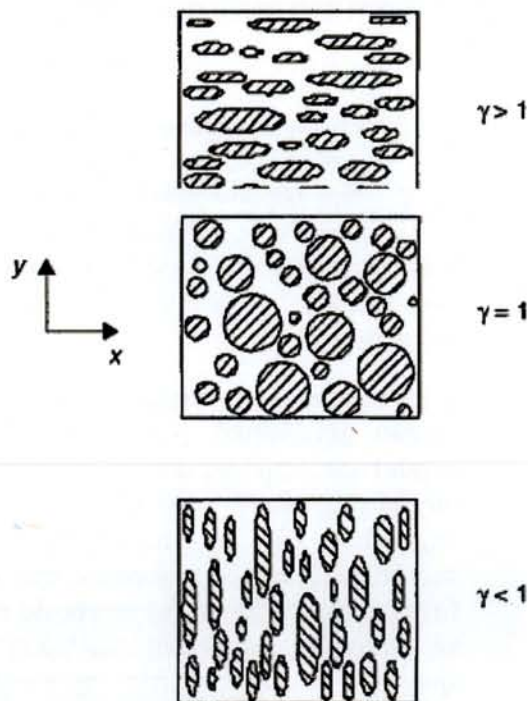
$$\sigma/\beta = 0,004$$

Στάδιο 3: Μετά από 100 ώρες λειτουργίας

$$\sigma_i = 0,30 \mu\text{m}$$

$$\eta\beta\sigma = 0,30$$

$$\sigma/\beta = 0,0028$$



(a) image topographique 2D



(b) représentation 3D

Σχήμα 1.10: Τυπική μικρογεωμετρία επιφάνειας κυλίνδρου (κατεργασία honning), με εμφανή τα πλέγματα παραλλήλων γραμμών και το σχήμα των ρόμβων με μικρή την διαγώνιο κατά το μήκος του κυλίνδρου. Τυπική ανισότροπη επιφάνεια με $\gamma < 1$ (εγκάρσια ανισοτροπία). (α) διδιάστατη απεικόνιση (β) τρισδιάστατη απεικόνιση

Επίδραση της ακτίνας καμπυλότητας (δακτύλιος $1^{ος}$ της φωτιάς)

Αποδεικνύεται και με βάση το θεωρητικό μοντέλο ότι ακτίνες καμπυλότητας της τάξης των μερικών δεκάδων χιλιοστών δίνουν παρόμοια αποτελέσματα (βελτιστοποιημένη περιοχή) γεγονός που αποδεικνύει τη συσσωρευμένη εμπειρία και την τεχνογνωσία των κατασκευαστών μηχανών για το συγκεκριμένο υποσύστημα της MEK, μείωση της ακτίνας καμπυλότητας αυτής μειώνει το πάχος της λιπαντικής

μεμβράνης κατά το σύνολο της διαδρομής ενώ αντιθέτως, αύξηση της ακτίνας καμπυλότητας οδηγεί σε κατατομές που τείνουν σε επίπεδο σχήμα με αυξημένες τις συνθήκες τριβής και φθοράς, επίσης καθ' όλη τη διαδρομή με συνεχή επαφή δακτυλίου – κυλίνδρου.

Σημείωση: Το θεωρητικό μοντέλο ως προς την υδροδυναμική συνιστώσα για τον υπολογισμό της δύναμης τριβής λαμβάνει ως γνωστόν υπόψη 2 παράγοντες. Ο πρώτος εξαρτάται από την ομαλότητα του προφίλ του δακτυλίου και το ιξώδες, ενώ ο δεύτερος εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα και το αντίστροφο της τιμής του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης. Συνεπώς όταν το προφίλ του δακτυλίου τείνει σε επίπεδο δακτύλιο οι υδροδυναμικές πιέσεις έχουν αρνητική τιμή δεν λαμβάνονται υπόψη και ο όρος αυτός αγνοείται.

Η ύπαρξη όμως αρνητικών πιέσεων τις οποίες μπορεί για μικρές αρνητικές τιμές να παραλάβει το λιπαντικό οδηγεί σε αβεβαιότητα παρουσίας του λιπαντικού στη διεπιφάνεια λόγω ενδεχομένως φαινομένων σπηλαίωσης (ασυνέχεια του λιπαντικού, φυσαλίδες κλπ). Έτσι ακόμη και στο δεύτερο όρο η αβεβαιότητα της παρουσίας του λιπαντικού, μπορεί να οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι η συνιστώσα της υδροδυναμικής τριβής καθορίζεται με μια μέγιστη τιμή της και έχει πεδίο ορισμού για κάθε τιμή της γωνίας του στροφαλοφόρου το διάστημα από την τιμή μηδέν έως τη μέγιστη που υπολογίζεται από το πρόβλημα.

Πειραματικά αποτελέσματα έχουν καταδείξει ότι μάλλον η υδροδυναμική συνιστώσα είναι απύσαστα στις περιπτώσεις αυτές. Η παρατήρηση μιας ελαφρώς μείωσης της συνολικής δύναμης τριβής στο μέσο της διαδρομής ερμηνεύεται με την υποτιθέμενη παραμόρφωση της διεπιφάνειας κυρίως στην περιοχή της μέγιστης μεταφορικής ταχύτητας όπου ελαφρά περιστροφή της κατατομής οδηγεί σε παρόμοια θεωρητικά αποτελέσματα.

Τραχύτητα και πάχος της λιπαντικής μεμβράνης

Τοπικά το πάχος της λιπαντικής μεμβράνης h_T είναι συνάρτηση:

- του τοπικού πάχους της λιπαντικής μεμβράνης h που αντιστοιχεί στην τοπική απόσταση μεταξύ των μέσων γραμμών των δύο κατατομών. Το μέγεθος μπορεί να καθοριστεί και από μέτρηση.
- των μεγεθών δ_1, δ_2 των υπομέτρων των σημείων των επιφανειών 1 και 2 αντίστοιχα που μετρώνται από τις μέσες γραμμές. Οι κατανομές $F_i(\delta)$ με $i=1,2$ είναι γενικά μη κανονικές.
- Της απόστασης $y_{0,i}$, $i=1,2$ που αντιστοιχεί στη απόσταση μεταξύ των μέσων γραμμών των πληθυσμών που λαμβάνονται υπόψη για κάθε επιφάνεια. Δηλαδή, αφενός του πληθυσμού των υπομέτρων των σημείων και αφετέρου του πληθυσμού των υπομέτρων των κορυφών των λόφων, απόσταση που είναι γενικά αρνητική.
- Τις σ_{p0} και σ_{pi} δηλαδή τις τυπικές αποκλίσεις των δυο προαναφερθέντων πληθυσμών.

Έτσι λοιπόν έχουμε: $h_T = h + \delta_1 + \delta_2$

Η συνθετική τραχύτητα $\delta_1 + \delta_2$ έχει τυπική απόκλιση έχει $\sigma_{\rho 0}$ έτσι ώστε:

$$\sigma_{\rho 0}^2 = \sigma_{\rho 01}^2 + \sigma_{\rho 02}^2$$

Δεχόμαστε γενικά ότι για $h/3 \sigma_{\rho 0} > 1$ η επίδραση στην τραχύτητα είναι αμελητέα. Η κατατομή κάθε λοφίσκου θεωρείται ότι περιγράφεται με μία παραβολική συνάρτηση $y = f(x)$. Αν ν η απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών λοφίσκων δύο σωμάτων υπάρχει επαφή όταν το $h + y_{01} + y_{02} < z_1 + z_2 - 2f(r/2)$, όπου z_1 και z_2 είναι τα υψόμετρα των λοφίσκων που μετρώνται από την μέση της γραμμής αναφοράς. Ορίζεται λοιπόν το μέγεθος $-w$ όπου.

$$1) w = z_1 + z_2 - 2f(r/2) - (h + y_{01} + y_{02}), [m]$$

$$2) \beta \text{ είναι η μέση τιμή της ακτίνας καμπυλότητας της ακτίνας των λοφίσκων. [m]}$$

$$3) \mu \text{ η πυκνότητα των λοφίσκων. [m}^{-2}]$$

Υδροδυναμική συνιστώσα :

Η εξίσωση του Reynolds που με τον δυναμικό της όρο δίνεται στη συνέχεια:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h^3 \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 6\eta u \frac{\partial h}{\partial x} + 12\eta \frac{\partial h}{\partial t}$$

σε περίπτωση τραχειών επιφανειών γράφεται ως εξής:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\Phi_x h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Phi_y h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6\eta(u_1 - u_2) \frac{\partial h_T}{\partial x} + 6(u_1 - u_2) \frac{\partial h_T}{\partial x} \sigma_{\rho 0} \frac{\partial \Phi_S}{\partial x} + 12\eta \frac{\partial h_T}{\partial t}$$

Όπου u_i με $i = 1, 2$ οι ταχύτητες των 2 επιφανειών σ' επαφή:

P: η μέση τοπική πίεση

Φ_x, Φ_y, Φ_S : συντελεστές ροής που εξαρτώνται από τον προσανατολισμό της τραχύτητας τις τυπικές αποκλίσεις των κατανομών της και της τοπικής τιμής του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης.

η : δυναμικό ή απόλυτο ιξώδες (στον κώδικα εμφανίζεται ως **Eta**). [Pas*s]

Οι δύο πρώτοι όροι της προηγούμενης έκφρασης προέρχονται από τους όρους που ακολουθούν, όπου η τιμή h_T αντικαθίσταται από τη διορθωμένη τιμή του τοπικού πάχους λιπαντικής μεμβράνης h λαμβανομένου υπόψη του συντελεστή ροής Φ_x, Φ_y :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h_T^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h_T^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right)$$

Ο συντελεστής Φ_x υπολογίζεται ως εξής:

$$\Phi_x = \frac{1}{L_y} \frac{\int_0^{L_y} \left(\frac{h_T^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) dy}{\left(\frac{h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right)} \quad \text{όπου: } \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{p_B - p_A}{L_x}$$

Σύμφωνα με τη θεωρία Patir-Cheng οι τιμές των συντελεστών αυτών που εξάγονται κατόπιν μαθηματικής προσομοίωσης τραχειών και ανισοτρόπων επιφανειών προσεγγίζονται ως εξής:

$$\Phi_x(H, \gamma) = \begin{cases} 1 - ce^{-rH}, & \gamma \leq 1 \\ 1 + cH^{-r}, & \gamma > 1 \end{cases} \quad \Phi_y(H, \gamma) = \Phi_x\left(H, \frac{1}{\gamma}\right)$$

Όπου: $H = \frac{h}{\sigma}$ και $\gamma = \frac{\lambda_{0,5x}}{\lambda_{0,5y}}$, γ : ο δείκτης ανισοτροπίας της τραχείας επιφάνειας που

χαρακτηρίζεται από τον λόγο των μηκών κύματος $\lambda_{0,5x}$ και $\lambda_{0,5y}$, οι τιμές των οποίων ισοδυναμούν με το μήκος κύματος λ στο οποίο η αρχική τιμή της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης της τραχύτητας πέφτει στο ήμισυ της αρχικής τιμής της. Οι κατευθύνσεις x, y ισοδυναμούν αντίστοιχα στην διαμήκη και την περιφερειακή κατεύθυνση. Η συνάρτηση αυτή δίνεται από τον τύπο:

$$R_{xx}(\lambda) = \frac{1}{N - \lambda} \sum_{i=1}^{N-\lambda} X(i)X(i + \lambda)$$

Όπου: N : Ο αριθμός των σημείων τη κατατομής της επιφάνειας.

λ : Η απόσταση μεταξύ δύο τεταγμένων ($R_{xx}(0) = \sigma_x^2$).

Οι τιμές των συντελεστών Φ_x, Φ_y, Φ_s και $\Phi(f_\rho), \Phi(f_s)$ δίνονται στο Κεφάλαιο 3.

Αν h η τοπική τιμή της λιπαντικής μεμβράνης \bar{h}_T ορίζεται σαν:

$$\bar{h}_T = \int_{-h}^{\infty} (h - \delta) f_{\rho_0}(\delta) d\delta$$

Για την επίλυση της εξίσωσης του Reynolds γίνεται χρήση των Συνοριακών Συνθηκών που είναι γνωστές ως Half Sommerfeld, αγνοούμε λοιπόν το πεδίο των πιέσεων της αποκλίνουσας περιοχής στην οποία οι τιμές των πιέσεων σύμφωνα με το Reynolds είναι αρνητικές.

Όταν οι επιφάνειες μπορούν να θεωρηθούν λείες τότε $\Phi_x = 1$ και $\Phi_y = 1$ και επειδή $\sigma_{\rho_0} = 0$ και το $h_T = h$ και $(u_1 - u_2) = u$ σχετική ταχύτητα. Έτσι η εξίσωση παίρνει την εξής μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6\eta u \frac{\partial h}{\partial x} + 12\eta \frac{\partial h}{\partial t}$$

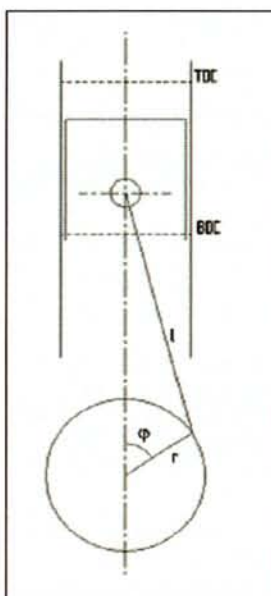
Αντιθέτως στην περιοχή που αναφέρεται στο μέσον της διαδρομής η μοναδική συνιστώσα είναι υδροδυναμικής φύσης και έχει τη μορφή:

$$F_H = \iint_s \tau_h ds$$

Το άθροισμα λοιπόν αυτών των δύο συνιστωσών θα μας δίνει την:

$$F_{total} = F_a + F_H$$

Επίδραση συχνότητας Περιστροφής



$$U = \pi(2R_c)(RPM/60) \left[\sin \varphi + \frac{2R_c \sin 2\varphi}{4M} \right] \text{ [m/s]}$$

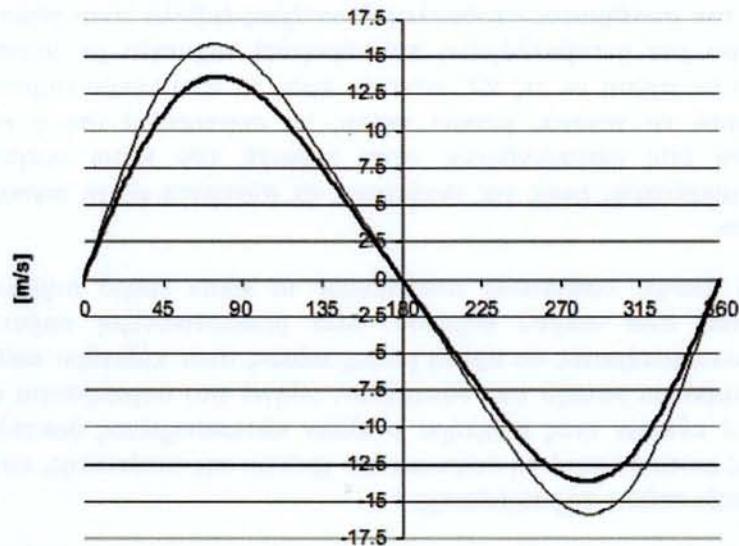
Όπου:

φ = γωνία περιστροφής του στροφαλοφόρου [rad]

R_c = ακτίνα του στροφαλοφόρου [m]

RPM = συχνότητα περιστροφής κινητήρα [ανά λεπτό]

M = μήκος διωστήρα-μπιέλλας [m]

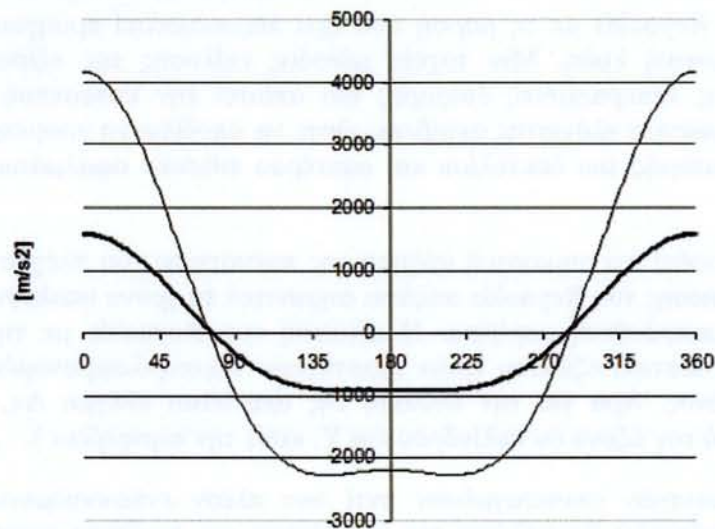


Σχήμα 1.12: Σχεδιάγραμμα γραμμικής ταχύτητας εμβόλου σε διαφορετικές RPM συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου

Σχόλιο σχήματος: Σημαντική παρατήρηση είναι ότι η γραμμική ταχύτητα του εμβόλου μεγιστοποιείται πριν από το άνω νεκρό σημείο, κάτι που επιδρά στο σημείο όπου μεγιστοποιούνται οι δυνάμεις τριβής.

$$a_p \approx \omega^2 r \left[\cos \varphi + \frac{R_c \cos 2\varphi}{M} \right] \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

Όπου: a_p : η επιτάχυνση του εμβόλου



Σχήμα 1.13: Σχήμα Σχεδιάγραμμα επιτάχυνσης εμβόλου σε διαφορετικές RPM συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου

Η κινηματική του συστήματος στρόφαλος-διωστήρας-έμβολο είναι γνωστό ότι δίνει σαν αποτέλεσμα μία μεταβαλλόμενη παλινδρομική ταχύτητα με μέγιστο ελαφρά μετατοπισμένο σε σχέση με τις 90° πάντοτε προς το άνω νεκρό σημείο (0° , 360° , 720°). Από αυτό το γεγονός μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι η κίνηση, είτε επιβραδυνόμενη είτε επιταχυνόμενη στην περιοχή του κάτω νεκρού σημείου σχετίζεται με μικρότερες τιμές της ταχύτητας, σε σύγκριση με τη περιοχή του άνω νεκρού σημείου.

Συνεπώς, από άποψη λιπαντικών απαιτήσεων το κάτω νεκρό σημείο θεωρείται κρισιμότερο του άνω νεκρού σημείου. Μία ρεαλιστικότερη παρατήρηση της κινηματικής του συστήματος σε σχέση με τις πιέσεις στον κύλινδρο καθώς και στις περιοχές του εμβόλου μεταξύ των δακτυλίων, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι κατά τη διάρκεια των 4 κύκλων ενός κινητήρα ο πλέον καταπονημένος δακτύλιος είναι ο δακτύλιος «της φωτιάς» κατά τη διάρκεια του χρόνου της εκτόνωσης, και καθώς και κατά το τελευταίο στάδιο της συμπίεσης.

Οι άλλοι 2 δακτύλιοι γενικά δεν επηρεάζονται από τις πιέσεις του κυλίνδρου, όπως επίσης και από τη συχνότητα περιστροφής (κυρίως κατά την κάθοδο ο δεύτερος δακτύλιος, και σε ολόκληρη την παλινδρόμηση ο τρίτος) εξαιτίας των κατατομών τους οι οποίες δεν επιτρέπουν αντίστοιχη απομάκρυνση από την επιφάνεια του κυλίνδρου παρά την ύπαρξη λιπαντικού μέσου.

Έτσι, οι συνεχείς επαφές των δακτυλίων αυτών με την επιφάνεια του χιτωνίου έχουν σαν αποτέλεσμα μεγάλες δυνάμεις τριβής σταθερές κατά την κίνηση ανεξάρτητες της συχνότητας, άρα και συνεχή παρουσία του μηχανισμού φθοράς. Στις περιπτώσεις αυτές ειδικά πρόσθετα, μεταξύ των άλλων, γνωστά σαν HP (High pressure) ή EP (extreme pression) δημιουργούν συνθήκες ελαχιστοποίησης φθοράς και τριβής γενικά με τη δημιουργία επιφανειακών χημικών ενώσεων με υψηλότερες αντοχές.

1.3 Πεπερασμένες Διαφορές

Η εξίσωση του Reynolds με τη μορφή που έχει παρουσιαστεί προηγουμένως, δεν επιδέχεται αναλυτική λύση. Μία ταχεία μέθοδος επίλυσης της εξίσωσης αυτής σχετίζεται με τις πεπερασμένες διαφορές και απαιτεί την κατασκευή πλέγματος απάνω στη διεπιφάνεια ελάχιστης ακρίβειας ώστε να αποδίδει τη γεωμετρική μορφή αφενός της κατατομής του δακτυλίου και αφετέρου πιθανών σφαλμάτων κατά την περιφέρεια.

Πρέπει να σημειωθεί ότι σημαντική αύξηση της πυκνότητας του πλέγματος για την επίλυση της εξίσωσης του Reynolds αυξάνει σημαντικά το χρόνο υπολογισμού χωρίς να προσφέρει επιπρόσθετη ακρίβεια. Η εξίσωση του Reynolds με την παρούσα μορφή είναι ουσιαστικά εξίσωση τριών διαστάσεων συμπεριλαμβανομένης και της παραμέτρου χρόνου. Άρα για την επίλυσή της απαιτείται πλέγμα Δx , Δy (X: Η κατεύθυνση κατά τον άξονα του κυλίνδρου και Y: κατά την περιφέρεια).

Η χρήση καρτεσιανών συντεταγμένων αντί των πλέον ενδεικνυόμενων για την περίπτωση κυλινδρικών διευκολύνει την αμεσότερη και ταχύτερη κατανόηση των ιδιοτήτων της διεπιφάνειας, λαμβανομένου υπ' όψη του αναπτύγματος της (αντί για κυλινδρική επιφάνεια επίπεδη)

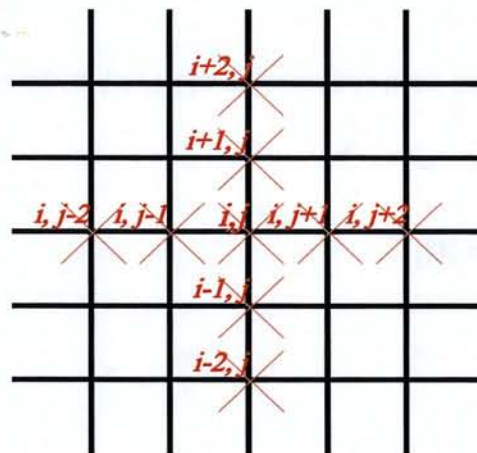
$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{h_{i,j+1} - h_{i,j-1}}{2\Delta x}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial P}{\partial x} \right) = h_{i,j+1}^3 \frac{P_{i,j+2} - P_{i,j}}{4\Delta x^2} - h_{i,j-1}^3 \frac{P_{i,j} - P_{i,j-2}}{4\Delta x^2}$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(h^3 \frac{\partial P}{\partial y} \right) = h_{i+1,j}^3 \frac{P_{i+2,j} - P_{i,j}}{4\Delta y^2} - h_{i-1,j}^3 \frac{P_{i,j} - P_{i-2,j}}{4\Delta y^2}$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{h_{i,j}|_{t_{k+1}} - h_{i,j}|_{t_k}}{\Delta t}$$

$$\Delta t = t_{k+1} - t_k$$



Σχήμα 1.14: Πλέγμα που χρησιμοποιείται για την μέθοδο πεπερασμένων διαφορών στην διεπιφάνεια χιτωνίου-δακτυλίου.

Έτσι η εξίσωση του Reynolds μπορεί να γραφεί για τον κόμβο i,j στην εξής στοιχειώδη μορφή:

$$C_1 P_{i,j} + C_2 P_{i,j+2} + C_3 P_{i,j-2} + C_4 P_{i+2,j} + C_5 P_{i-2,j} = Q$$

Όπου:

$$C_1 = \frac{h_{i,j+1}^3 + h_{i,j-1}^3}{4\Delta x^2} + \frac{h_{i+1,j}^3 + h_{i-1,j}^3}{4\Delta y^2}$$

$$C_2 = -\frac{h_{i,j+1}^3}{4\Delta x^2}$$

$$C_3 = -\frac{h_{i,j-1}^3}{4\Delta x^2}$$

$$C_4 = -\frac{h_{i+1,j}^3}{4\Delta y^2}$$

$$C_5 = -\frac{h_{i-1,j}^3}{4\Delta y^2}$$

$$\text{και: } Q = -6\eta U \frac{h_{i,j+1} + h_{i,j-1}}{2\Delta x} - 12\eta \frac{h_{i,j}|_{t_{k+1}} - h_{i,j}|_{t_k}}{\Delta t}$$

Έτσι η στοιχειώδης εξίσωση αυτή γράφεται με τη μορφή πινάκων:

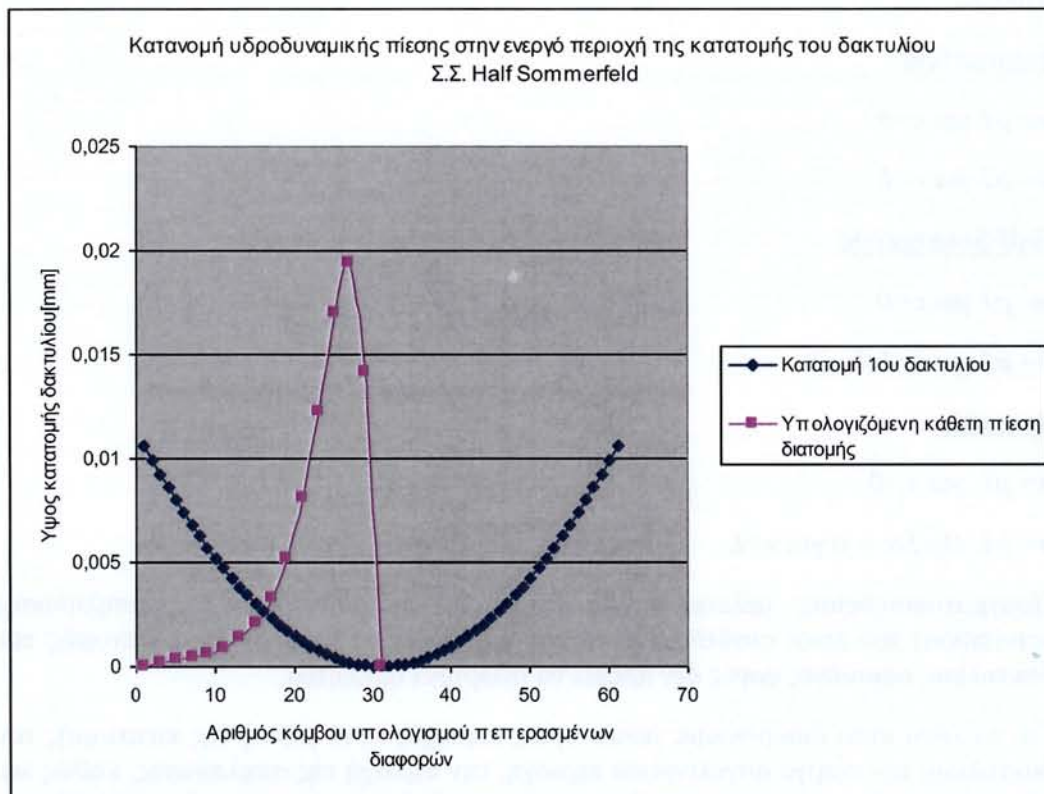
$$[C_2, C_3, C_1, C_4, C_5] \begin{Bmatrix} P_{i,j+1} \\ P_{i,j-1} \\ P_{i,j} \\ P_{i+1,j} \\ P_{i-1,j} \end{Bmatrix} = \{Q\}$$

Η οποία μετά την μορφοποίηση οδηγεί στην εξίσωση των σφαιρικών μητρώων με τη μορφή: $[C][P]=[Q]$

Συνεπώς $P = C^{-1} \times Q$, όπου P είναι ο πίνακας των τιμών της υδροδυναμικής πίεσης στους κόμβους του πλέγματος με βήμα $2\Delta x$ και $2\Delta y$.

Η διαδικασία της επίλυσης περιλαμβάνει την επιβολή (υπόθεση) το μητρώου των τιμών $H(i,j)$ στη συνέχεια υπολογίζονται οι τιμές $P(i,j)$ οι οποίες είναι αποδεκτές όταν το ολοκλήρωμά τους πάνω στο ενεργό τμήμα της επιφάνειας ($P(i,j)>0$), εξισορροπεί το ελαστικό φορτίο (W_{tar}) που προέρχεται από την παραμόρφωση του δακτυλίου και επιπρόσθετα σε περίπτωση λειτουργίας του συστήματος σε 4χρονη MEK το φορτίο της πίεσης των αερίων στην περιοχή του δακτυλίου. Σε περίπτωση ισορροπίας η υδροδυναμική συνιστώσα της τριβής δίνεται από τον τύπο:

$$F_{htot} = \iint_s \left(\frac{h}{2} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\eta U}{h} \right) ds$$



Σχήμα 1.14: Τυπική κατατομή 1^{ου} δακτυλίου με την κατανομή υδροδυναμικών πιέσεων κατά την κίνηση προς τα αριστερά (από κάτω νεκρό σημείο προς άνω νεκρό σημείο).

Τελικά η επίλυση του συστήματος επιτυγχάνεται με τη χρήση της μεθόδου Jacobi η οποία αντιμετωπίζει πολύ πιο γρήγορα (συγκλίνει) την επίλυση συστήματος όπου τα στοιχεία της διαγωνίου ισούνται με το άθροισμα των στοιχείων της γραμμής.

Συνοριακές Συνθήκες (Σ.Σ.)

Κατά την ανάλυση της λίπανσης η κατανομή των τιμών της υδροδυναμικής πίεσης μεταξύ του δακτυλίου και της παρειάς του χιτωνίου καθορίζεται γενικά από τρεις τύπους συνοριακών συνθηκών.

- 1) Τις Σ.Σ. γνωστές ως Sommerfeld
- 2) Τις Σ. Σ. γνωστές ως Half-Sommerfeld (τμημένες Sommerfeld)
- 3) Τις Σ. Σ. γνωστές ως Reynolds

Οι συνοριακές συνθήκες αυτές περιγράφονται από τις ακόλουθες μαθηματικές σχέσεις.

Sommerfeld

$$p = p_1 \text{ για } x=0$$

$$p = p_2 \text{ για } x=L$$

Half-Sommerfeld

$$p = p_1 \text{ για } x=0$$

$$p = p_2 \text{ για } x=L(h_{min})$$

Reynolds

$$p = p_1 \text{ για } x=0$$

$$p = p_2, Dp/Dx = 0 \text{ για } x=L$$

Πραγματοποιηθείσες μελέτες έχουν δείξει ότι το φαινόμενο της σπηλαίωσης (cavitation) που είναι συνδεδεμένο με την αποκλίνουσα περιοχή της κατανομής του δακτυλίου, ορισμένες φορές δεν πρέπει να θεωρηθεί αμελητέο.

Για το λόγο αυτό διακρίνουμε γενικά τρεις περιοχές κατά μήκος της κατατομής του δακτυλίου, την ενεργό συγκλίνουσα περιοχή, την περιοχή της σπηλαίωσης, καθώς και μία περιοχή αποκόλλησης της λιπαντικής μεμβράνης στην ουριαία περιοχή του δακτυλίου.

Γενικά, η πρακτική ευκολία της χρήσης των συνθηκών Half-Sommerfeld, οδήγησε στην εφαρμογή τους στον παρόντα υπολογιστικό κώδικα, γνωστού όντως από τη βιβλιογραφία του γεγονότος ότι, οι διαφορές των αποτελεσμάτων δεν έχουν πρακτική σημασία.

Η μέθοδος της επίλυσης της εξίσωσης του Reynolds με χρήση των πεπερασμένων διαφορών περιγράφεται, με τις παρακάτω σχέσεις:

$$h(x,y,t) = h_0(y,t) + h_1(x)$$

Όπου h_0 = η ελάχιστη τιμή του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης

$$h_1(x) = \text{η κατατομή του δακτυλίου}$$

Το υδροδυναμικό φορτίο που παραλαμβάνει η λιπαινόμενη περιοχή δίνεται από τη σχέση:

$$W_h(t) = \iint_s P(x,y,t) X(p) ds$$

Όπου:

$$X(p) = 0 \text{ για } P < 0$$

$$X(p) = 1 \text{ για } P \geq 0$$

Εξάλλου, στη γενική περίπτωση των τραχειών επιφανειών (ή επαφή λείας επιφάνειας με την ισοδύναμη τραχεία) στην περίπτωση ελαστικής παραμόρφωσης των λοφίσκων της τραχύτητας (σε στρωμένο κινητήρα το αντίστοιχο φορτίο επαφής δίνεται από τον τύπο):

$$W_a(h', t) = \frac{16}{15} \sqrt{2\pi} \times (\eta\beta\sigma)^2 \times E' \times \sqrt{\sigma/\beta} \times A \times F_{5/2}$$

Όπου:

$h' = h'(x, y, t) = h(x, y, t) - y_o$ και y_o η απόσταση των μέσων τιμών των πληθυσμών των υπομέτρων σημείων και κορυφών λοφίσκων της κατατομής αντίστοιχα:

Ενώ:

$$A = \pi DL$$

$$E' = \frac{1}{\frac{1-n_1^2}{E_1} + \frac{1-n_2^2}{E_2}} [Pa]$$

$$F_i(h'/\sigma) = \int_{h'/\sigma}^{\infty} (s - h'/\sigma)^i f(s) ds, i = 2 \text{ ή } 2.5$$

Όπου: $E_i, i = 1, 2$ το μέτρο ελαστικότητας του υλικού

$n_i, i = 1, 2$ συντελεστής Poisson

και $\int_{-\infty}^{\infty} f(s) ds = 1, f(s)$: η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής των

υπομέτρων των κορυφών των λοφίσκων. Η συνάρτηση αυτή αποδεικνύεται ότι είναι συμμετρική με χαρακτηριστικά πλησίον της κανονικής κατανομής γεγονός που υποστηρίζει τον υπολογισμό των τιμών των συναρτήσεων W_a με βάση τις τιμές που προτείνονται απ' τους Patir και Cheng.

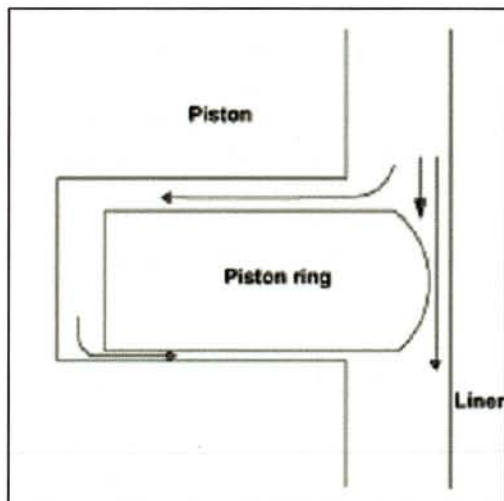
Η ακτινική ισορροπία του δακτυλίου αποκαθίσταται όταν :

$$W_{tot}(t) = \pi DL(P_{tar} + \text{Max}(P_1(t), P_2(t))) = W_a(t) + W_h(t)$$

Όπου P_{tar} η ομοιόμορφα κατανεμημένη πίεση μεταξύ δακτυλίου κυλίνδρου, η οποία κατά τους κατασκευαστές είναι $P_{tar} = 2f(t)/DL$

Όπου $f(t)$ η εφαπτομενική δύναμη που απαιτείται να εφαρμοστεί στα άκρα του διακένου ώστε ο δακτύλιος να παραμένει κλειστός. πχ για $P_{tar} = 200000 Pa$, $D = 88 mm$ και $L = 1.75 mm$ η $f(t) = 15,4 N$

Σαν ένα πρώτο βήμα για την εγκυρότητα των θεωρητικών αποτελεσμάτων (που θα συγκριθούν στη συνέχεια με τα αποτελέσματα των μετρήσεων), θεωρείται η σύγκριση ως προς τις τιμές σε kPa των τιμών P_{mf} (mean friction pressure) μέση πίεση-απώλεια λόγω τριβών. Μετρήσεις σε αντίστοιχο προσομοιωτή ή ακόμη και σε εν λειτουργία κινητήρα δείχνουν μια αμελητέα διασπορά των αποτελεσμάτων σε περίπτωση ετεροκινούμενης MEK.

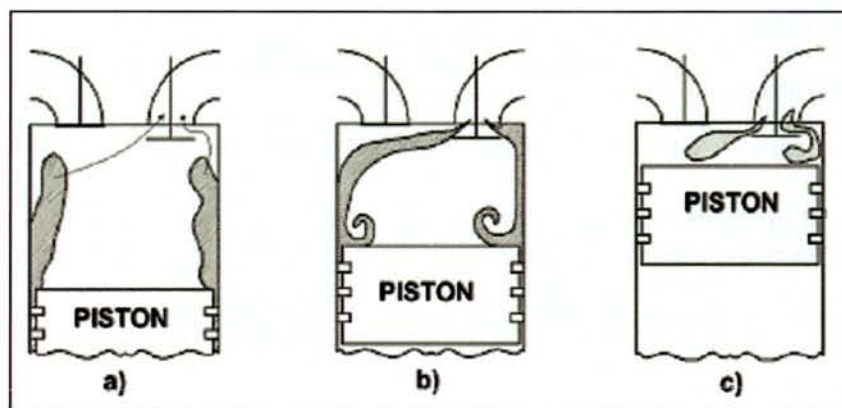


Σχήμα 1.15:Ερμηνεία δράσης πίεσης κυλίνδρου- Blow By ,1^{ος} δακτύλιος.

Η συμφωνία μεταξύ των θεωρητικών αποτελεσμάτων και των πειραματικών πάνω στον προσομοιωτή του πανεπιστημίου Θεσσαλίας, υποστηρίζει μια πρώτη εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου κατά τη λειτουργία μίας αυτοκινούμενης MEK. Στην περίπτωση αυτή ο 2^{ος} και 3^{ος} δακτύλιος δεν εμφανίζουν ευαισθησία σχετική με την πίεση των αερίων μέσα στον θάλαμο καύσης. Το γεγονός αυτό επαληθεύεται με βάση μετρήσεις πίεσης στις περιοχές μεταξύ των δακτυλίων. Οι τιμές των πιέσεων αυτών μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες γεγονός που επιτρέπει τη σύγκριση των αντίστοιχων P_{mf} των δακτυλίων 2 και 3 εν κενώ, με την P_{mf} του πρώτου δακτυλίου υπό φορτίο. Άθροισμα

των αντίστοιχων P_{mf} δύναται να δώσει «συνθετική τιμή» των ολικών απωλειών λόγω τριβών που οφείλονται στην παρουσία των δακτυλίων που είναι σαφώς συγκρίσιμη με την αντίστοιχη συνθετική τιμή που προέρχεται από τις αντίστοιχες μετρήσεις.

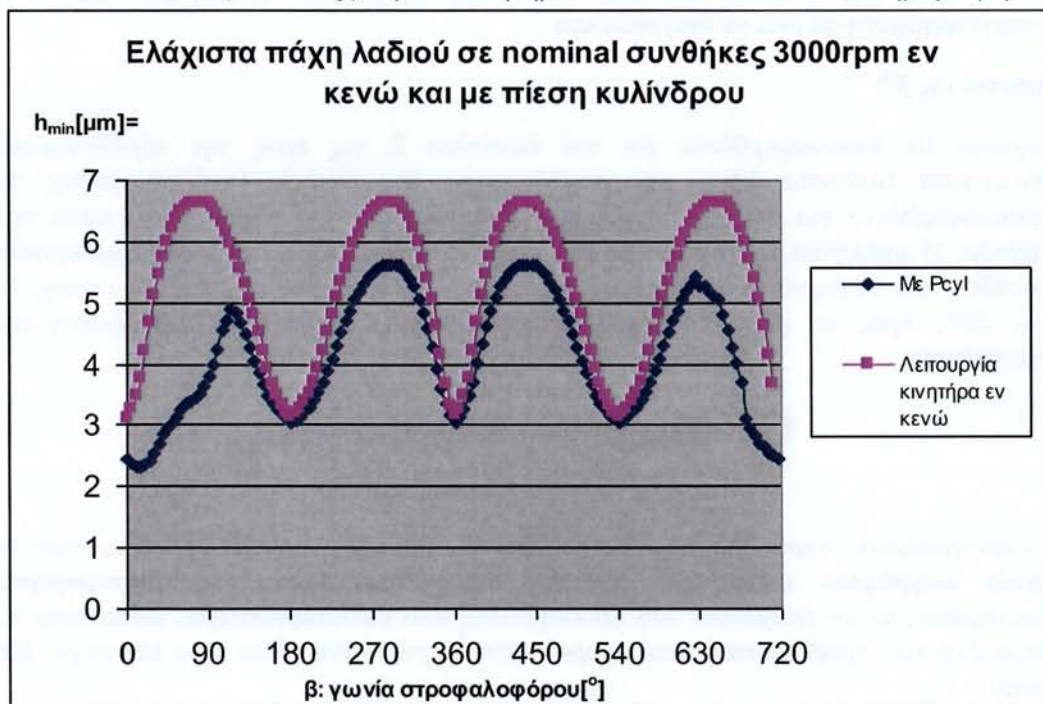
Στη συνέχεια ακολουθούν χαρακτηριστικά ενδεικτικά διαγράμματα μεταβολής του ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και της αντίστοιχης δύναμης τριβής με εφαρμογή σε αυτοκινούμενο κινητήρα καθώς και σε ετεροκινούμενο (πειραματικός προσομοιωτής).



Σχήμα 1.16: Χαρακτηριστικές θέσεις του εμβόλου κατά τη φάση της εξαγωγής, κατά την οποία εξακολουθούν να υφίστανται μη μηδενικές τιμές υπερπίεσης στον κύλινδρο.



Σχήμα 1.17: Μεταβολή της πίεσης στο θάλαμο καύσης και στον χώρο μεταξύ 1^{ου} και 2^{ου} δακτυλίου (blow by) για κινητήρα Renault 551 σε πλήρες φορτίο.



Σχήμα 1.18: Μεταβολή του ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης 1^{ου} δακτυλίου για κινητήρα Renault 551 σε πλήρες φορτίο και χωρίς φορτίο.

Παρατηρώντας τα προηγούμενα διαγράμματα αντιλαμβάνεται κανείς τον πρωταγωνιστικό ρόλο της τραχύτητας κυρίως κατά τη φάση της καύσης – εκτόνωσης και αυτής της συμπίεσης. Η επίδραση της πίεσης των αερίων κατά τη διάρκεια των άλλων φάσεων (εξαγωγή και εισαγωγή) παραμένει αμελητέα. Αιτιολογία που υποστηρίζει την χρησιμότητα του ετεροκινούμενου προσομοιωτή 2^{ης} γενιάς (τύπου ανοιχτού κυλίνδρου).

Δακτύλιος 1^{ος}

Με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων τελικά η κυριότερη διαφοροποίηση των τιμών της δύναμης τριβής εμφανίζεται στα νεκρά σημεία με αποκλίσεις που φτάνουν μέχρι ποσοστό 100%. Συνεπώς, η προτεινόμενη τιμή 0.08 του a για τον υπολογισμό της δύναμης τριβής Greenwood – Tripp ($F_{\text{total}} = aW_{\text{total}} + \tau_0 * A$) απαιτεί αναθεώρηση. Με προτεινόμενη τελικά νέα τιμή στην περιοχή 0,16 έως 0,20.

Δακτύλιος 2^{ος}

Ως προς την τιμή του συντελεστή a ισχύουν τα προαναφερθέντα. Παράλληλα η σταθερότητα της συνολικής δύναμης τριβής κατά την κάθοδο του συστήματος (από άνω νεκρό σημείο προς κάτω νεκρό σημείο) δείχνει τελικά ουσιαστική απουσία της υδροδυναμικής συνιστώσας σε περίπτωση κατατομής αποκλίνουσας μορφής. Η παρατήρηση, μάλιστα, ελάχιστης τιμής της τριβής στην περιοχή μέγιστης γραμμικής ταχύτητας του εμβόλου στηρίζει αφενός μεν την πιθανότητα παραμόρφωσης της διεπιφάνειας στη περιοχή αυτή ή/και μικρή συμμετοχή της υδροδυναμικής συνιστώσας κατά την κάθοδο στις περιοχές των νεκρών σημείων. Σημειώνεται ότι μια πτώση της τάξεως 10 έως 20% της θεωρητικά σταθερής F_{total} είναι καταγεγραμμένη σε όλα τα διαγράμματα .

Δακτύλιος 3^{ος}

Ισχύουν τα προαναφερθέντα για τον δακτύλιο 2, ως προς την υδροδυναμική συνιστώσα (απουσία λόγω μη συγκλίνουσας κατατομής). Ισχύουν επίσης τα προαναφερθέντα για την μη υδροδυναμική συνιστώσα του δακτυλίου 2 κατά την κάθοδο. Η αμελητέα εξάρτηση της τιμής της δύναμης τριβής από τη θερμοκρασία καταδεικνύει τα μη υδροδυναμικά της χαρακτηριστικά. Πτώση της τάξεως επίσης 10 έως 20% προς το μέσο της διαδρομής υποστηρίζει πιθανή παραμόρφωση της διεπιφάνειας.

1.4 Θεωρητικά Αποτελέσματα

Οι προηγούμενες παρατηρήσεις οδήγησαν σε αλλαγή τιμών ορισμένων δεδομένων τα οποία ελήφθησαν υπόψη για τη θεωρητική προσέγγιση της συμπεριφοράς συστήματος με τη γεωμετρία του προσομοιωτή που κατασκευάστηκε, ειδικότερα τα δεδομένα του προβλήματος που αφορούν στον πρώτο δακτύλιο ,του κινητήρα fiat είναι:

$L=0.00175\text{m}$, $R=0.036\text{m}$, $D=0.088\text{m}$,

$2R_c=89\text{mm}$, $M=145,5\text{mm}$, $P_{tar,nom}=200.000\text{Pa}$



Υδροδυναμική συνιστώσα τριβής. Μοντέλο Patir-Cheng (γενικευμένη εξίσωση Reynolds)

Ο προσδιορισμός της υδροδυναμικής συνιστώσας γίνεται μετά την επίλυση της γενικευμένης εξίσωσης του Reynolds για τραχείες και ανισότροπες ως προς την τραχύτητα επιφάνειες. Η εξίσωση αυτή προσδιορίζει την κατανομή του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης που στον κώδικα που χρησιμοποιείται στην σημερινή έκδοση είναι σταθερή κατά την περιφέρεια του δακτυλίου. Πρόκειται για μια εξίσωση που αναφέρεται στο τριών διαστάσεων χαρακτήρα πρόβλημα συμπεριλαμβανομένου και του παράγοντα χρόνου (σαν Τρίτη διάσταση).

Μη υδροδυναμική συνιστώσα Μοντέλο Greenwood-Trip (γενίκευση του μοντέλου Hertz για επαφές μεταξύ λοφίσκων τραχειών επιφανειών)

Ο προσδιορισμός της μη υδροδυναμικής συνιστώσας γίνεται για ελαστικές παραμορφώσεις λοφίσκων των τραχειών επιφανειών που στο μοντέλο Greenwood-Trip εμφανίζονται ως παραβολοειδή εκ περιστροφής διαφόρων υψομέτρων και σταθερής ακτίνας καμπυλότητας κορυφής. Γίνεται, λοιπόν, μελέτη για τον προσδιορισμό του αριθμού των επαφών της πραγματικής επιφάνειας επαφής καθώς και του φορτίου επαφής που παραλαμβάνουν οι υπο ελαστική παραμόρφωση λοφίσκοι χωρίς να είναι δυνατή οποιαδήποτε ερμηνεία της φθοράς με τον χρόνο λειτουργίας.

Μέθοδος επίλυσης της εξίσωσης ισορροπίας του δακτυλίου

Η ισορροπία του δακτυλίου αναφέρεται στο ακτινικής κατεύθυνσης φορτίο πάνω στη διεπιφάνεια.

Ισχύει δηλαδή σε όλη την περίμετρο του δακτυλίου για κάθε στοιχειώδες τμήμα του η δύναμη που εξασκείται από τον δακτύλιο δηλαδή η προερχόμενη από την “ελαστική” πίεση καθώς και την πίεση των αερίων του κυλίνδρου (blow-by) ότι αντισταθμίζεται από την υδροδυναμική φορτό ικανότητα της λιπαντικής μεμβράνης προσανζημένη με το υποβασταζόμενο φορτίο από τους τυπό παραμόρφωση λοφίσκους των τραχειών επιφανειών.

Η μέθοδος επίλυσης βασίζεται στην μεθοδολογία χρήσης των πεπερασμένων διαφορών (finite difference method) κυρίως για την επίλυση της γενικευμένης εξίσωσης του Reynolds και όχι τόσο για τον υπολογισμό της μη υδροδυναμικής συνιστώσας για την οποία οι πεπερασμένες διαφορές ευλόγως χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις μη επιπέδων επιφανειών επαφής (δηλαδή για την μετάβαση από μία θεωρητικά καμπύλη επιφάνεια στην αντίστοιχη επιφάνεια με διακριτές στοιχειώδεις επίπεδες διαμορφώσεις)

Χαρακτηριστικά γεωμετρίας κινητήρα και δακτυλίου.

Η γεωμετρία του κινητήρα θεωρείται χωρίς μακρο-γεωμετρικά σφάλματα ο δακτύλιος, λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς με τρεις διαφορετικές μορφές που εμφανίζουν οι τρεις διαφορετικοί τύποι δακτυλίων σύμφωνα με το αμερικανικό μοντέλο δηλαδή ο πρώτος(της φωτιάς με προφίλ που παρουσιάζει ακτίνα καμπυλότητας R), ο δεύτερος(στεγανοποιητικός παρουσιάζει κόλouro-κωνική φυσιογνωμία με την αιχμή στραμμένη προς το κάτω νεκρό σημείο) και ο τρίτος (στραγγιστικός εμφανίζει δύο λεπτά επίπεδα χείλη)

Χαρακτηριστικά μικρο γεωμετρίας της διεπιφάνειας

Στον κώδικα γίνεται σαφής διαχωρισμός κυρίως 2 χαρακτηριστικών πληθυσμών που αφορούν στην τραχύτητα μιας ισοδύναμης τραχείας επιφάνειας που προέρχεται από της δύο τραχείες επιφάνειες αφενός του δακτυλίου και αφετέρου του κυλίνδρου. Οι δύο πληθυσμοί αυτοί αναφέρονται ο μὲν πρώτος στην στατιστική κατανομή των υψομέτρων των σημείων της σύνθετης αυτής κατατομής η οποία γενικά δεν συμφωνεί με την κανονική κατανομή (Gauss) η οποία λαμβάνεται υπόψη σε άλλα θεωρητικά μοντέλα προσομοίωσης. Αφετέρου και για το μοντέλο του Greenwood-Trip γίνεται χρήση της υψομετρικής κατανομής των κορυφών των λοφίσκων που διαφέρει και αυτή με την σειρά της από την κανονική κατανομή και για μη φθαρμένες ή μερικώς φθαρμένες επιφάνειες είναι μετατοπισμένη αισθητά και ως προς την θέση και ως προς την μορφή σε σύγκριση με την κατανομή του προηγούμενου πληθυσμού. Ο τρίτος πληθυσμός που εν δυνάμει λαμβάνεται υπ όψη και πάλι στο μοντέλο Greenwood-Trip είναι ο πληθυσμός των ακτινών καμπυλότητας των κορυφών των λοφίσκων των τραχειών επιφανειών βασική αντίφαση μεταξύ των δύο προαναφερθέντων μοντέλων είναι στενά συνδεδεμένη με την λεπτομερέστερη περιγραφή των λοφίσκων αυτών. Στο μὲν πρώτο μοντέλο που αναφέρεται γενικά σε ανισότροπες επιφάνειες ως προς την τραχύτητα ο δείκτης ανισοτροπίας σχετίζεται με την μορφή των διατομών αυτών των λοφίσκων. Δηλαδή λαμβάνονται υπ όψη λοφίσκοι με μορφή παραβολοειδών εκ περιστροφής για τις ισότροπες τραχείες επιφάνειες και με μορφή πεπλατυσμένων παραβολοειδών εκ περιστροφής για της ανισότροπες επιφάνειες. Παράλληλα όμως στο μοντέλο των Greenwood-Trip η γενίκευση του μοντέλου του Hertz στηρίζεται μόνο σε λοφίσκους ισότροπης επιφάνειας με σταθερή ακτίνα καμπυλότητας κορυφής και διαφοροποιημένες τις τιμές των υψομέτρων των αντίστοιχων κορυφών.

Ο υπολογιστικός κώδικας, για τον οποίο θα υπάρχουν βελτιώσεις στην συνέχεια, αναπτύχθηκε καταρχάς έτσι ώστε να λειτουργεί για υδροδυναμικό έδρανο ολίσθησης, π.χ. στροφαλοφόρου άξονα. Η ανάπτυξη του μοντέλου ήταν πολύ πιο απλή από την σημερινή και αναφερόταν σε έδρανο τριών διαστάσεων δηλαδή πεπερασμένου μήκους το οποίο προσέδιδε σχετική δυσκολία στην επίλυση του προβλήματος και στο οποίο υπήρχε η δυνατότητα αφενός μὲν δυναμικής φόρτισης, δηλαδή αυξομείωσης του φορτίου κατά την διάρκεια λειτουργίας του εδράνου και αφετέρου υπήρχε και η δυνατότητα να ληφθούν υπόψη μακρο-γεωμετρικά σφάλματα του στάτη (bearing) κυρίως υπό την μορφή κυματώσεων (τόσο ως προς την περιφερειακή όσο και προς την αξονική κατεύθυνση).

Κατά την διερεύνηση της δραστηριότητας του κώδικα έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων του με αντίστοιχα αποτελέσματα που δημοσίευσε η ινδική τριβολογική εταιρία (Hirany). Επίσης έγινε σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα

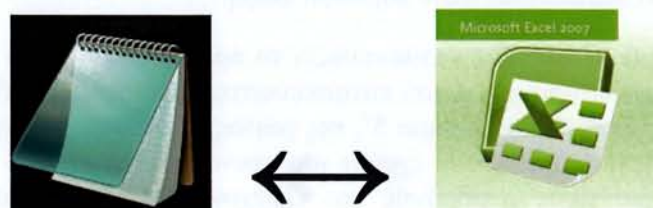
(NASA) και μάλιστα για έδρανο με περιφερειακή κυμάτωση τύπου 3-wave και μάλιστα σε περιβάλλον αερολίπανσης (λιπαντικό μέσο ατμοσφαιρικός αέρας). Επειδή η συμφωνία με τα αποτελέσματα των δύο συγκρίσεων θεωρήθηκε αρκετά ικανοποιητική, έγινε χαρτογράφηση τύπου Boyd-Raymond. Χάρτες αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα στις ΗΠΑ και εξακολουθούν να έχουν την ίδια βαρύτητα που είχαν το 1965 κατά την φάση απλουστευτικών μελετών ταχείας προσέγγισης.

Η επέκταση του μοντέλου έγινε προς 3 βασικές κατευθύνσεις:

- 1^{ον} Με το πέρασμα από την σταθερής συχνότητας περιστροφής λειτουργίας ενός εδράνου στην παλινδρόμηση ενός εμβόλου
- 2^{ον} Με την μετάβαση από την λεία επιφάνεια με μακρο-γεωμετρικά σφάλματα στον συνδυασμό δύο τραχέων επιφανειών γενικά ανισότροπων
- 3^{ον} Με την θεώρηση διαφορετικής ανισοτροπίας τραχύτητας για κάθε μία από τις τριβόμενες επιφάνειες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Ανάλυση αλγορίθμου και αλλαγών που έγιναν στον κώδικα



Ανάλυση αλγορίθμου και αλλαγών που έγιναν στον κώδικα

Ο αλγόριθμος oilfilm που εξελίσσεται τα τελευταία 15 χρόνια στο πανεπιστήμιο Θεσσαλίας είναι ένας αλγόριθμος ο οποίος υπολογίζει μέσα από θεωρητικές προσεγγίσεις την λίπανση στην επιφάνεια επαφής μεταξύ χιτωνίου και των δακτυλίων εμβολοφόρου MEK. Ουσιαστικά αυτός ο κώδικας επιλύει την εξίσωση του Reynolds η οποία προέρχεται από τις εξισώσεις των Navies-Stokes, οι οποίες προκύπτουν από τον 2^ο νόμο του Νεύτωνα για την κίνηση ρευστών.

Αρχικά ο κώδικας λαμβάνει από τον χρήστη τα χαρακτηριστικά της γεωμετρίας και της μικρό γεωμετρίας του κινητήρα και του δακτυλίου αντίστοιχα, καθώς επίσης και δεδομένα για τις φυσικές ιδιότητες του λιπαντικού μέσου και για το υλικό κατασκευής χιτωνίου και του δακτυλίου. Στην συνέχεια ο χρήστης επιλέγει 1 από τα 3 δακτυλίδια του οποίου την θεωρητική προσομοίωση θέλει να μελετήσει και την συχνότητα περιστροφής που τον ενδιαφέρει. Τέλος διαλέγει και τους χρόνους του κύκλου Otto για τους οποίους θέλει να δει την προσομοίωση.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια είναι για 2 χρόνους δηλαδή για 360° περιστροφής του στροφαλοφόρου άξονα. Επιλέχτηκε αυτή η γωνία γιατί το ελάχιστο πάχος της λιπαντικής μεμβράνης είναι μια συμμετρική εξίσωση με περίοδο της 180° και η συνιστώσες της δύναμης τριβής είναι αντί-συμμετρικές και έτσι είναι δυνατή η προσομοίωση της συμπεριφοράς του δακτυλίου για συνθήκες ανοικτού κυλίνδρου δηλαδή χωρίς την επίδραση της πίεσης, συνθήκες που προσεγγίζουν αυτές τον χρόνο εισαγωγής και εξαγωγής. Σημειώνεται ότι ο κώδικας μπορεί να λάβει υπόψη την καμπύλη της πίεσης του κυλίνδρου για τον πλήρη κύκλο που δεν θεωρήθηκε απαραίτητο να διερευνηθεί στην παρούσα φάση.

Στην συνέχεια ο κώδικας κατασκευάζει το προφίλ (κατατομή) του δακτυλίου που επιλέξαμε να μελετήσουμε. Αφού κατασκευαστεί το προφίλ ο κώδικας μπαίνει σε μια επαναληπτική διαδικασία με βήμα 5°, της γωνίας β του στροφαλοφόρου άξονα. Μέσα στην επαναληπτική διαδικασία έχουμε μια επαναληπτική μέθοδο που αλλάζοντας το πάχος της λιπαντικής μεμβράνης και ελέγχοντας την ισορροπία των δυνάμεων συγκλίνει σε ένα ελάχιστο πάχος λιπαντικής μεμβράνης που ικανοποιεί την συνθήκη της ισορροπίας. Μέσα σε αυτήν την επαναληπτική μέθοδο, σε κάθε επανάληψη, γίνεται επίλυση της εξίσωσης του Reynolds με την χρήση πεπερασμένων διαφορών, όπως παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 1. Μέσα από την επίλυση των πεπερασμένων διαφορών καταλήγουμε σε μια πίεση λειτουργίας η οποία μας προσδιορίζει, φορτία επαφής και τις δυνάμεις τριβής. Μέσα από αυτά τα φορτία γίνεται ο έλεγχος της ισορροπίας, που μας ενδιαφέρει για την επαναληπτική μέθοδο. Εφ' όσον επέλθει η ισορροπία η επαναληπτική μέθοδος συγκλίνει σε μία τιμή του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης και περνά στο επόμενο βήμα της επαναληπτικής διαδικασίας. Επειδή κατά το πρώτο βήμα υπολογισμών που αναφέρεται στην αρχική γωνία του στροφαλοφόρου άξονα δεν υπολογίζεται με ακρίβεια ο δυναμικός όρος dh/dt είναι αυτονόητο ότι οι πρώτες τιμές που υπολογίζει ο κώδικας τόσο ως προς το πάχος της λιπαντικής μεμβράνης όσο και για την δύναμη τριβής είναι ανακριβή. Ο πλήρης κύκλος θεωρείται ότι είναι αποδεκτός όταν αποκτά περιοδικά χαρακτηριστικά δηλαδή όταν η

τιμή που υπολογίζεται στην γωνία β ισούται με την αντίστοιχη τιμή β -360° για λειτουργία χωρίς πίεση είτε για την τιμή β -720° για την λειτουργία του κινητήρα υπό φορτίο. Όταν λοιπόν υπάρξει αυτή η ισότητα η καμπύλη διορθώνεται αντικαθιστώντας την αρχική της περιοχή με τις ανακριβείς τιμές της με την τελικά αποδεκτή περιοδική λύση.

Τέλος αφού και η επαναληπτική διαδικασία φτάσει στο τέλος της, τα αποτελέσματα της θεωρητικής προσομοίωσης συγκεντρώνονται και αποθηκεύονται σε υπολογιστικά φύλλα του Excel. Στο Excel γίνεται και απεικόνιση των αποτελεσμάτων σε διαγράμματα για καλύτερη κατανόηση. Μέχρι τώρα η συγκέντρωση και η αποθήκευση των αποτελεσμάτων γινόταν από τον χρήστη, πλέον στα πλαίσια της προσπάθειας βελτίωσης του κώδικα τα αποτελέσματα συγκεντρώνονται αποθηκεύονται και παριστάνονται σε διαγράμματα αυτόματα μετά το πέρας της προσομοίωσης.

Για την καλύτερη κατανόηση και περιγραφή του υπολογιστικού κώδικα oilfilm η ανάλυση προγράμματος θα γίνει σε εννέα ενότητες.

Ενότητα 1

Στην πρώτη ενότητα θα μας απασχολήσει μόνο το κομμάτι των φυσικών δεδομένων και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κινητήρα του οποίου την λίπανση προσπαθούμε να υπολογίσουμε.

Ενότητα 2

Από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που δώσαμε στην ενότητα 1 ο κώδικας κατασκευάζει το προφίλ του δακτυλίου που αποφασίσαμε να μελετήσουμε

Ενότητα 3

Στην συνέχεια του κώδικα εισάγονται πάλι από φύλλο Excel κάποιοι παράγοντες οι οποίοι είναι συντελεστές πολυωνυμικών προσεγγίσεων για την κατασκευή διορθωτικών συντελεστών ροής.

Ενότητα 4

Από τους παράγοντες τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά καθώς και από το προφίλ του δακτυλίου που δημιουργήθηκαν στις ενότητες 1-3 του κώδικα κατασκευάζεται μια αρχική προσέγγιση της λιπαντικής μεμβράνης. Καθώς επίσης και το βήμα της προηγούμενης επανάληψης για την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών.

Ενότητα 5

Από τα δεδομένα που έχει δώσει ο χρήστης υπολογίζεται η γραμμική ταχύτητα του εμβόλου καθώς και οι συντελεστές της εξίσωσης του Reynolds για την επίλυση της με την μέθοδο πεπερασμένων διαφορών.

Ενότητα 6

Στην ενότητα αυτή επιλύεται το γραμμικό σύστημα $[C] [P]=[Q]$ που προκύπτει από την εξίσωση του Reynolds για την εύρεση της πίεσης.

Ενότητα 7

Εφόσον πλέον έχει υπολογιστεί η πίεση λειτουργίας του κινητήρα το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός των φορτίων και των δυνάμεων που παράγονται λόγω της πίεσης που υπολογίστηκε.

Ενότητα 8

Ακολουθεί ο έλεγχος ισορροπίας των φορτίων καθώς και η διόρθωση του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης μέσα στα πλαίσια της επαναληπτικής μεθόδου που χρησιμοποιείται.

Ενότητα 9

Τέλος ακολουθεί και το κομμάτι ενασχόλησης με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Καθώς επίσης και η αποθήκευση τους και η έκφρασή τους σε διαγράμματα για καλύτερη μελέτη και κατανόησή τους. Πάνω στα πλαίσια βελτίωσης του κώδικα πλέον η αποθήκευση γίνεται αυτόματα όπως και η σχεδίαση των διαγραμμάτων.

2.1 Εισαγωγή δεδομένων

Σε αυτό το κομμάτι ο χρήστης εισάγει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κινητήρα προς εξέταση, το εύρος του πλέγματος διακριτοποίησης της επιφάνειας του δακτυλίου, δεδομένα που αφορούν τα μέτρα ελαστικότητας των υλικών από τα οποία είναι φτιαγμένα ο δακτύλιος και το χιτώνιο, το απόλυτο ιξώδες του λιπαντικού υλικού που χρησιμοποιείται και τέλος η μέση πίεση λειτουργίας σε Pa. Επίσης εισάγονται και στατιστικά μεγέθη που αφορούν στην επιφάνεια του δακτυλίου και στην τραχύτητα της. Στην προσπάθεια που έγινε για τον εκσυγχρονισμό και την βελτίωση του κώδικα τα δεδομένα πλέον δεν εισάγονται μέσα στον κώδικα αλλά σε ένα υπολογιστικό φύλλο Excel. Τα γεωμετρικά στοιχεία που εισάγονται είναι το μήκος διωστήρα, η διάμετρος του κυλίνδρου και η ακτίνα καμπυλότητας του δακτυλίου.

```

77 - E1=10000000000;
78 - E2=10000000000;
79 - Ecomp=1/((1-Poisson1^2)/E1+(1-Poisson2^2)/E2);
80 - Vhma=1;
81 - Hmin=0.000003;
82 - Hk_1=Hmin;
83 - ideg=0;
84 - net=21;
85 - n=net;
86 - L=0.00175;
87 - R=0.04;
88 - D=0.088;
89 - DH=0.00001;
90 - eta=0.006;
91 - dt=5*60/(RPM*360);
92 - Ptar=200000;
93 - Max_repeat=100000;
94 - pi=4.*atan(1.);
95 - dx=L/(n-1);
96 - dy=(pi*D)/(n-1);
    
```

Σχήμα 2.1: Παλιός τρόπος εισαγωγής δεδομένων απευθείας στον κώδικα.

	A	B	C	D
1		STATE OF WEAR		
2		Brand new	After running in	Broken
3	RMS	0,000001414	0,0000006	0,0000003
4	RMS1	0	0,0000006	0,0000003
5	NBS	0,2	0,17	0,3
6	SB	0,05	0,004	0,0028
7	ho	0,0000004	0,0000002	0,00000014
8	g	1	1	3
9	g1	9	1	3
10	g2	0,111	1	3
11				

	A	B	C
1	Τύπος	Συμβολισμός	Τιμές
2	Μέτρο ελαστικότητας υλικού δακτυλίου	E1	1000000000
3	Μέτρο ελαστικότητας υλικού χιτωνίου	E2	1000000000
4	Αρχική εκτίμηση ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης	Hmin	0,000003
5	Εύρος πλέγματος διακριτοποίησης	Net	21
6	Πάχος δακτυλίου σε m	L	0,00175
7	Ακτίνα καμπυλότητας δακτυλίου σε m	R	0,04
8	Διάμετρος Κυλίνδρου	D	0,088
9	Μήκος διωστήρα σε m	m	0,1455
10	Μήκος διαδρομής σε m	d	0,0089
11	Απόλυτο ιξώδες λαδιού σε Pa*s	eta	0,006
12	Κατανεμημένη πίεση μεταξύ δακτυλίου κυλίνδρου σε Pa	Ptar	200000

Σχήμα 2.2:Νέος τρόπος εισαγωγής δεδομένων σε φύλλο Excel

Όπου :

RMS , τυπική απόκλιση πληθυσμού υψομέτρων σημείων τραχείας κατατομής.

RMS1 , τυπική απόκλιση πληθυσμού υψομέτρων σημείων τραχείας κατατομής χιτωνίου.

NBS , γινόμενο $\eta \cdot \beta \cdot \sigma$ όπου η αριθμός λοφίσκων ανά επιφάνεια , β μέσος όρος ακτινών καμπυλότητας κορυφών λόφων και σ τυπική απόκλιση πληθυσμού κορυφών λοφίσκων .

SB , πηλίκο σ/β όπου σ τυπική απόκλιση πληθυσμού κορυφών λοφίσκων, β μέσος όρος ακτινών καμπυλότητας κορυφών λόφων

g , δείκτης ανισοτροπίας συνολικός

g1, δείκτης ανισοτροπίας χιτωνίου

g2, δείκτης ανισοτροπίας δακτυλίου

E1,E2 ,μέτρα ελαστικότητας δακτυλίου χιτωνίου αντίστοιχα

Hmin, αρχική εκτίμηση ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης

net , εύρος πλέγματος διακριτοποίησης (για την επίλυση των πεπερασμένων διαφορών)

L, Πάχος δακτυλίου σε m

R, ακτίνα καμπυλότητας δακτυλίου m

D, διάμετρος δακτυλίου m

m, μήκος διωστήρα σε m

d, μήκος διαδρομής σε m

Eta, απόλυτο (δυναμικό) ιξώδες λιπαντικού Pa*s

Ptar, ομοιόμορφα κατανεμημένη πίεση μεταξύ δακτυλίου κυλίνδρου Pa

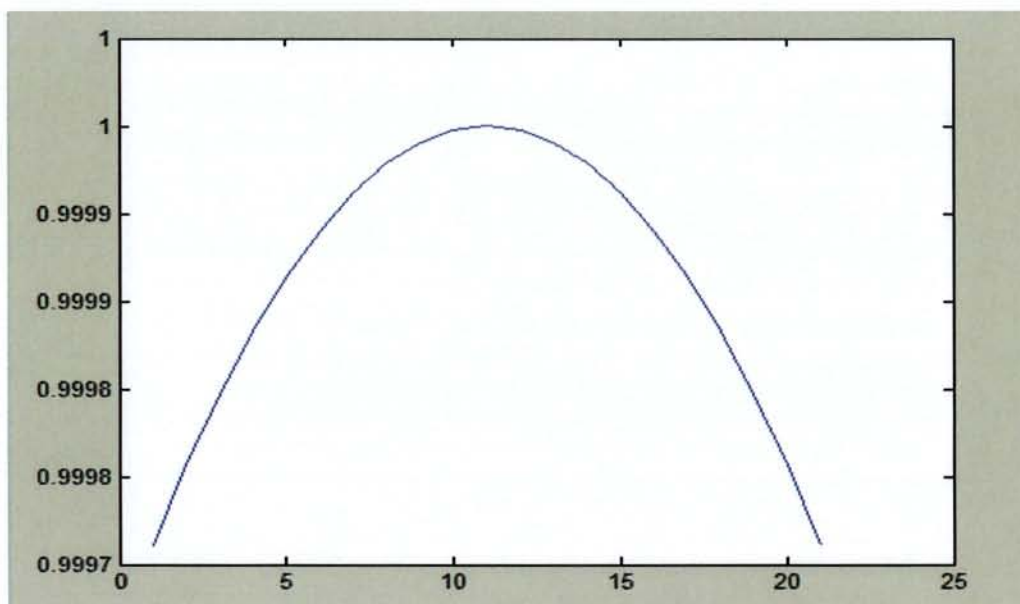
Max_repeat, οι μέγιστες επαναλήψεις στην σύγκλιση της επαναληπτικής μεθόδου εύρεσης της πίεσης που ασκείται στον δακτύλιο κατά την λειτουργία του που θα αναλυθεί παρακάτω.

Όπως είναι φανερό με την επεξεργασία που έγινε και με το νέο δεδομένο πλέον ότι όλα εισάγονται σε φύλλο Excel διασφαλίζεται ασφαλέστερη χρήση του κώδικα. Είναι ασφαλέστερη γιατί γράφοντας στο Excel δεν υπάρχει ο φόβος αλλαγής κάποιου στοιχείου στον κώδικα. Επίσης μπορούμε να πούμε ότι γίνεται και ευκολότερη η εισαγωγή των δεδομένων γιατί το πρόγραμμα Excel είναι φιλικότερο σε χρήση από ότι ο κώδικας ο ίδιος.

2.2 Κατασκευή του προφίλ του δακτυλίου

Σε αυτό το κομμάτι του κώδικα κατασκευάζεται με την βοήθεια των γεωμετρικών χαρακτηριστικών που δόθηκαν παραπάνω και με την χρήση πολυωνυμικών προσεγγίσεων ένα προφίλ για τον δακτύλιο γενικώς αποδεκτό.

Αφού ο χρήστης αποφασίσει με ποιόν δακτύλιο θα θέλει να δουλέψει στην αρχή του προγράμματος στην συνέχεια ο κώδικας διαλέγει την κατάλληλη πολυωνυμική προσέγγιση και φτιάχνει το προφίλ όπως φαίνεται και παρακάτω.



Σχήμα 2.3: Η κατασκευή του προφίλ, του πρώτου δακτυλίου, στην εγκάρσια κατεύθυνση (Rad) σύμφωνα με την πολυωνυμική προσέγγιση που χρησιμοποιήθηκε στον κώδικα. Στον άξονα τον χ βρίσκεται ο αριθμός των κόμβων του πλέγματος διακριτοποίησης.

Παρακάτω δίνεται ένα παράδειγμα του κώδικα για την κατασκευή του προφίλ του 1^{ου} δακτυλίου.

```
for i=1:n
for j=1:n
if (iring==1)
Paxos(i,j)=-(L/2.-(j-1)*dx);
Rad(i,j)=cos(asin(abs(Paxos(i,j))/R));
end
if (iring==2)
Paxos(i,j)=(j-1)*dx;
Rad(i,j)=cos(atan(DH/L));
end
if (iring==3)
Paxos(i,j)=(j-1)*dx;
Rad(i,j)=1;
end
end
end
```

Σχήμα 2.4: κατασκευή του προφίλ στην εγκάρσια (Rad) και στην διαμήκη κατεύθυνση του δακτυλίου (Paxos)

2.3 Εισαγωγή συντελεστών με σκοπό την δημιουργία διορθωτικών συντελεστών ροής

Σε αυτήν την ενότητα του κώδικα εισάγονται συντελεστές προσεγγιστικών πολυωνύμων που μας βοηθούν να υπολογίσουμε τους διορθωτικούς συντελεστές ροής Φ_i . Οι συντελεστές ροής Φ_i εξαρτώνται από τον προσανατολισμό της τραχύτητας τις τυπικές αποκλίσεις των κατανομών της και της τοπικής τιμής του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης.

Οι συντελεστές εισάγονται για 1^η φορά στον κώδικα oilfilm και αποτελέσματα της εισαγωγής τους διαφαίνονται στο κεφάλαιο .

Έτσι λοιπόν πλέον ο κώδικας διαβάζει από ένα φύλλο Excel τους παράγοντες που χρειάζονται για την πιο λεπτομερή θεωρητική προσομοίωση .

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	γ	C	r	A1	a1	a2	a3	A2	A3	a4	a5	a6	D	s	
2	0,111	1,48	0,42	2,046	1,12	0,76	0,03	1,856	14,1	2,45	2,3	0,1	1,51	0,52	
3	0,167	1,38	0,42	1,962	1,08	0,77	0,03	1,754	13,4	2,42	2,3	0,1	1,51	0,54	
4	0,333	1,18	0,42	1,858	1,01	0,76	0,03	1,561	12,3	2,32	2,3	0,1	1,47	0,58	
5	1	0,9	0,56	1,899	0,98	0,92	0,05	1,126	11,1	2,31	2,38	0,11	1,4	0,66	
6	3	0,225	1,5	1,86	0,85	1,13	0,08	0,556	9,8	2,25	2,8	0,18	0,98	0,79	
7	6	0,52	1,5	1,24	0,62	1,09	0,08	0,338	10,1	2,25	2,9	0,18	0,97	0,91	
8	9	0,87	1,5	1,011	0,54	1,07	0,08	0,295	8,7	2,15	2,97	0,18	0,73	0,91	
9															

Σχήμα 2.5: οι συντελεστές που χρησιμοποιούνται για την εύρεση των διορθωτικών συντελεστών ροής Φ_i ανάλογα με την τραχύτητα της επιφάνειας γ .

Στον κώδικα η ανάγνωση του πίνακα γίνεται αυτόματα χωρίς να εμπλέκεται ο χρήστης ανάλογα με την τιμή που έχουμε δώσει στην εισαγωγή δεδομένων για τα γ , γ_1 , γ_2 .

2.4 Προσέγγιση πάχους λιπαντικής μεμβράνης και κατασκευή των διορθωτικών συντελεστών ροής

Σε αυτό το σημείο του κώδικα έχουμε εισέλθει σε μια επαναληπτική διαδικασία η οποία μας πηγαίνει από τον πρώτο χρόνο μέχρι τον όποιο χρόνο του κύκλου Otto διαλέξουμε με ένα σταθερό βήμα. Επίσης έχουμε εισέλθει και σε μια επαναληπτική μέθοδο η οποία μέσα από μια δοκιμασία δοκιμής και σφάλματος καταλήγει σε ένα συγκεκριμένο ελάχιστο πάχος λιπαντικής μεμβράνης όταν φτάσει στην συνθήκη τερματισμού της.

Ουσιαστικά σε αυτήν την μέθοδο το πρόγραμμα αφού λάβει μια αρχική προσέγγιση από τον χρήστη για το ελάχιστο πάχος λιπαντικής μεμβράνης, όπως είπαμε στην ενότητα 1, επιλύει την εξίσωση του Reynolds με την χρήση πεπερασμένων διαφορών, για τον αριθμό των κόμβων που έχουμε επιλέξει στην ενότητα 1. Επιλύοντας την εξίσωση καταλήγει μετά από ορισμένα βήματα, που θα αναλύσουμε παρακάτω, σε ένα συνολικό φορτίο. Αυτό το φορτίο θέλουμε να έρθει σε ισορροπία με το φορτίο που δημιουργεί η μέση πίεση λειτουργίας.

Πέρα από την προσέγγιση του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης κατασκευάζονται και οι διορθωτικοί συντελεστές ροής των οποίων τα δεδομένα λάβαμε στην ενότητα 3. Επίσης δημιουργείται και το ύψος της λιπαντικής μεμβράνης της προηγούμενης επανάληψης το οποίο το χρησιμοποιούμε στην επίλυση της εξίσωσης του Reynolds με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Το αποτέλεσμα του προηγούμενου βήματος στις πεπερασμένες διαφορές το χρησιμοποιούμε στην σχέση :

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{h_{i,j}|_{t_{k+1}} - h_{i,j}|_{t_k}}{\Delta t}.$$

for i=1:n

for j=1:n

if(iring==1)

Ypsos(i,j)=(R-(R^2-Paxos(i,j)^2)^(0.5))+Hmin;

if g<=1

Fx(i,j)=1-Ccx*exp(-Rrx*Ypsos(i,j)/RMS);

Fy(i,j)=1+Ccy*(Ypsos(i,j)/RMS)^-Rry;

elseif g>1

Fy(i,j)=1-Ccy*exp(-Rry*Ypsos(i,j)/RMS);

Fx(i,j)=1+Ccx*(Ypsos(i,j)/RMS)^-Rrx;

end

Ffp(i,j)=1-Dd*exp(-Ss*Ypsos(i,j)/RMS);

htt(i,j)=((-*(Ypsos(i,j)*10^6)^6)+(0.0036*(Ypsos(i,j)*10^6)^5)+

(-0.0481*(Ypsos(i,j)*10^6)^4)+(0.3027*(Ypsos(i,j)*10^6)^3)-
(0.876*(Ypsos(i,j)*10^6)^2)+(0.7343*Ypsos(i,j)*10^6)+0.986);

ht(i,j)=(0.0064*(Ypsos(i,j)*10^6)^2+0.9192*(Ypsos(i,j)*10^6)+0.1961);

Fs(i,j)=(RMS1^2/RMS^2)*(AA11*((Ypsos(i,j)/RMS)^(aa11))*

exp(-aa21*(Ypsos(i,j)/RMS)+aa31*(Ypsos(i,j)/RMS)^(2)))-

((RMS^2-RMS1^2)/RMS^2)*(AA12*((Ypsos(i,j)/RMS)^(aa12))*

exp(-aa22*(Ypsos(i,j)/RMS)+aa32*(Ypsos(i,j)/RMS)^(2)));

Ffs(i,j)=((RMS1^2/RMS^2)*(AA31*((Ypsos(i,j)/RMS)^(aa41))*







```

exp(-aa51*(Ypsos(i,j)/RMS)+aa61*(Ypsos(i,j)/RMS)^(2))-
((RMS^2-RMS1^2)/RMS^2)*AA32*((Ypsos(i,j)/RMS)^(aa42))*
exp(-aa52*(Ypsos(i,j)/RMS)+aa62*(Ypsos(i,j)/RMS)^(2)));
if (Ypsos(i,j)/RMS)>7
Ffs(i,j)=0;
end
if Ypsos(i,j)>5*10^-6
htt(i,j)=(1/(Ypsos(i,j)*10^6));
ht(i,j)=Ypsos(i,j)*10^6;
end
if((Ypsos(i,j)/RMS)>=5.0)
Fs(i,j)=(RMS1^2/RMS^2)*(AA21*exp(-0.25*(Ypsos(i,j)/RMS)))-((RMS^2-
RMS1^2)/RMS^2)*(AA22*exp(-0.25*(Ypsos(i,j)/RMS)));
end
if((Ypsos(i,j)-ho)/RMS<=4.0&&(Ypsos(i,j)-ho)/RMS>3.5)
F25(i,j)=(1.1201/10000)*((4-(Ypsos(i,j)-ho)/RMS)^1.9447);
elseif((Ypsos(i,j)-ho)/RMS<=3.5)
F25(i,j)=(2.1339/10000)*exp(3.804467*log(4-(Ypsos(i,j)-ho)/RMS)+(1.341516*log(4-(Ypsos(i,j)-
ho)/RMS))^2);
else
F25(i,j)=0;
end
end
end

```

Σχήμα 2.6.1: το κομμάτι του κώδικα που δημιουργεί την αρχική πρόβλεψη του ελάχιστου πάχους της λιπαντικής μεμβράνης (Ypsos) καθώς και τους διορθωτικούς συντελεστές ροής Φ_i (Fx, Fy, Ffp, htt, ht, Fs, Ffs, F25)

```

4 -  for i=1:n
5 -  for j=1:n
6 -  if (iring==1)
7 -  YpsosO(i,j) = (R - (R^2 - Paxos(i,j)^2)^(0.5)) + Hk_1;
8 -  end

```

Σχήμα 2.6.2: το κομμάτι του κώδικα στο οποίο αποθηκεύεται το αποτέλεσμα της προηγούμενης προσέγγισης του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης για να γίνει χρήση του αργότερα στην μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών.

2.5 Γραμμική ταχύτητα εμβόλου και συντελεστές εξίσωσης Reynolds

Η γραμμική ταχύτητα του εμβόλου υπολογίζεται από την σχέση που είδαμε στο 1^ο κεφάλαιο.

$$U = \pi(2R_c)(RPM/60) \left[\sin \varphi + \frac{2R_c \sin 2\varphi}{4M} \right] \text{ [m/s]}$$

Όπου:

φ = γωνία περιστροφής του στροφαλοφόρου [rad]

R_c = ακτίνα του στροφαλοφόρου [m]

RPM = συχνότητα περιστροφής κινητήρα [ανά λεπτό]

M = μήκος διωστήρα-μπιέλλας [m]

Στον κώδικα υπολογίζεται από την σχέση:

$$U = \pi * d * RPM * (\sin(\text{angle}) + (d * 10^3) * \sin(2 * \text{angle}) / (4 * m * 10^3)) / 60;$$

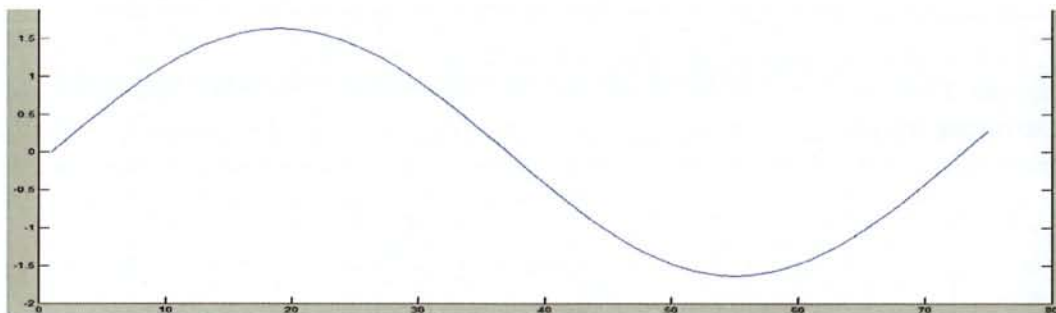
Όπου : $\pi = \pi$

$$d = 2 * R_c$$

RPM = συχνότητα περιστροφής

angle = γωνία στροφαλοφόρου (που αποτελεί και το βήμα της επαναληπτικής διαδικασίας)

m = μήκος διωστήρα-μπιέλλας [m]



Σχήμα 2.7.1: διάγραμμα γραμμικής ταχύτητας U συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου β . Στον άξονα των ψ βρίσκεται το μέτρο της γραμμικής ταχύτητας εμβόλου, και στον άξονα των χ η γωνία του στροφαλοφόρου άξονα με μονάδα τις 5 μοίρες.

Οι συντελεστές της εξίσωσης του Reynolds όπως αναλύθηκαν στο πρώτο κεφάλαιο εισάγονται στον κώδικα με την μορφή πινάκων όπως φαίνεται παρακάτω.

```

5 - for i=2:2:k
6 - for j=2:2:k
7 - Q(a,1)=(-6*eta*U*(Y(i,j+1)-Y(i,j-1))/(2*dx))-6*RMS*U*eta*(F3(i,j+1)-F3(i,j-1))/(2*dx)-12*eta*(Y(i,j)-Yo(i,j))/(dt);
8 - a=a+1;
9 - end
10 - end
11 - a=1;
12 - for i=2:2:k
13 - for j=2:2:k
14 - if(j==2)
15 - Q(a,1)=Q(a+1,1)+(Q(a+1,1)-Q(a+2,1));
16 - end
17 - if(j==k)
18 - Q(a)=Q(a-1,1)+(Q(a-1,1)-Q(a-2,1));
19 - end
20 - a=a+1;
21 - end
22 - end

```

Σχήμα 2.7.2: δημιουργία του συντελεστή Q της εξίσωσης Reynolds (

$$Q = -6\eta U \frac{h_{i,j+1} + h_{i,j-1}}{2\Delta x} - 12\eta \frac{h_{i,j}|_{t_{k+1}} - h_{i,j}|_{t_k}}{\Delta t}.$$

$$C_1 = \frac{h_{i,j+1}^3 + h_{i,j-1}^3}{4\Delta x^2} + \frac{h_{i+1,j}^3 + h_{i-1,j}^3}{4\Delta y^2}$$

$$C_2 = -\frac{h_{i,j+1}^3}{4\Delta x^2}$$

$$C_3 = -\frac{h_{i,j-1}^3}{4\Delta x^2}$$

$$C_4 = -\frac{h_{i+1,j}^3}{4\Delta y^2}$$

$$C_5 = -\frac{h_{i-1,j}^3}{4\Delta y^2}$$


```

25 - a=1;
26 - b=m+1;
27 - for i=2:2:z+1
28 -     for j=2:2:z+1
29 -         C(a,b-1)=-F1(i,j-1)*((Y(i,j-1)^3)/(4*dx^2));
30 -         C(a,b+1)=-F1(i,j+1)*((Y(i,j+1)^3)/(4*dx^2));
31 -         C(a,b-m)=-F2(i-1,1)*((Y(i-1,j)^3)/(4*dy^2));
32 -         C(a,b+m)=-F2(i+1,1)*((Y(i+1,j)^3)/(4*dy^2));
33 -         C(a,b)=(C(a,b-1)+C(a,b+1)+C(a,b-m)+C(a,b+m))*(-1);
34 -         a=a+1;
35 -         b=b+1;
36 -     end
37 - end

```

Σχήμα 2.8.1: Δημιουργία του συντελεστή C της εξίσωσης του Reynolds όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο 1. Όπου : $C(a,b-1)=C_3$, $C(a,b+1)=C_2$, $C(a,b-m)=C_5$, $C(a,b+m)=C_4$, $C(a,b)=C_1$.

Στην συνέχεια κατασκευάζεται ένα μητρώο που περιέχει όλα τα στοιχεία C του πλέγματος. Η κατασκευή αυτού του μητρώου γίνεται για να μπορούμε με μια επαναληπτική μέθοδο να υπολογίσουμε την πίεση που αναπτύσσεται και από εκεί στην συνέχεια τις δυνάμεις που θέλουμε.

```

187 - a=1;
188 - b=m+1;
189 - for i=1:n
190 -     for j=1:n
191 -         CC(i,j)=C(a,b);
192 -         b=b+1;
193 -     end

```

Σχήμα 2.8.2: κατασκευή μητρώου CC που περιέχει όλα τα στοιχεία του C που υπολογίσαμε παραπάνω για την επίλυση του γραμμικού συστήματος που προκύπτει.

2.6 Επίλυση του γραμμικού συστήματος που προκύπτει της μορφής

$$A \cdot x = B$$

Στην ενότητα αυτή επιλύεται το γραμμικό σύστημα $[C] [P]=[Q]$ που προέκυψε από τους συντελεστές της εξίσωσης Reynolds. Η επίλυση του συστήματος γίνεται για την εύρεση της πίεσης λειτουργίας μέσα από την οποία θα καταλήξουμε εντέλει σε δυνάμεις που μας χρειάζονται για την επαναληπτική μέθοδο.

Το σύστημα αυτό είναι της μορφής $A \cdot x = B$, όπου $A=C$, $x=P$ και $B=Q$. Λογικά θα έπρεπε να λυθεί με μια άμεση μέθοδο της μορφής $x=A^{-1} \cdot B$. Αλλά με τους υπολογιστές που υπάρχουν μέχρι σήμερα είναι αδύνατο να υπολογιστεί με επιθυμητή ακρίβεια ο αντίστροφος του πίνακα C καθώς οι τιμές που παίρνει είναι πολύ κοντά

στο μηδέν (-10^{-8} , $+10^{-8}$). Γι αυτό τον λόγο έχει επιλεγθεί μια επαναληπτική μέθοδος επίλυσης.

Η μέθοδος αυτή είναι του Jacobi, σύμφωνα με την οποία το μητρώο A γράφεται ως άθροισμα της κύριας διαγωνίου του και των υπόλοιπων στοιχείων του A ($A=D+R$). Αφού γίνει αυτό το σύστημα παίρνει την μορφή $D*x+R*x=B \leftrightarrow D*x=B-R*x$. Μετά αρχίζει η επαναληπτική μέθοδος η οποία υπολογίζει το x με δεδομένο το x από την προηγούμενη επανάληψη με την σχέση $x^k=D^{-1}*(B-R*x^{k-1})$. Οι επαναλήψεις σταματούν όταν ικανοποιηθεί το κριτήριο τερματισμού. Το κριτήριο τερματισμού προκύπτει όταν το απόλυτο σχετικό σφάλμα φτάσει σε μια τιμή που προσδιορίζει τον αριθμό των σημαντικών ψηφίων.

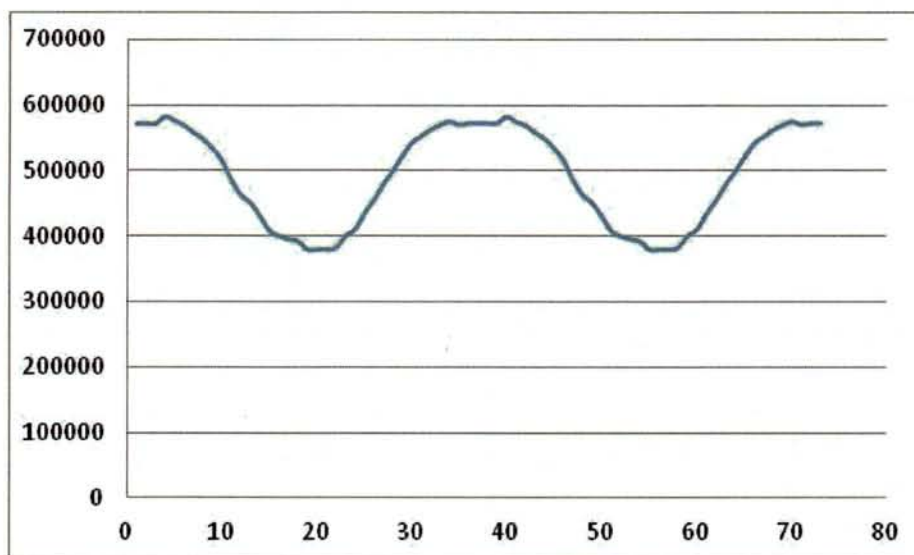
Η σχέση για την συνθήκη τερματισμού είναι $\frac{x^{k-1}-x^k}{x^k} < \frac{1}{2} * 10^{-m}$. Η σχέση αυτή αποτελεί την συνθήκη τερματισμού της επαναληπτικής μεθόδου προσδιορισμού της πίεσης. Όπου m προσδιορίζει την ακρίβεια του αποτελέσματος καθώς δείχνει τον αριθμό των σημαντικών ψηφίων. Στην περίπτωση του κώδικα χρησιμοποιείται ακρίβεια ενός σημαντικού ψηφίου.

```

2 - U=A-tril(A);
3 - L=A-triu(A);
4 - D=A-L-U;
5 - R=L+U;
6 - w=0;
7 - while(4)
8 -   X=inv(D)*(B-R*Xo);
9 -   if abs((X-Xo)/X)<error
10 -     Xo=X;
11 -     w;
12 -     break
13 -   elseif w>1000000
14 -     break
15 -   end
16 -
17 -     w=w+1;
18 -     Xo=X;
19 -   end

```

Σχήμα 2.9: το κομμάτι του κώδικα όπου επιλύεται το γραμμικό σύστημα για την εύρεση της πίεσης.



Σχήμα 2.10: ένα απλό παράδειγμα της πίεσης όπως αυτή υπολογίζεται για ένα τύπο κινητήρα στις 3500 rpm υπολογισμένη από την επίλυση του γραμμικού συστήματος για έναν κόμβο του πλέγματος. Στον άξονα των χ είναι η γωνία στροφαλοφόρου (ανά 5 μοίρες) και στον άξονα τον ψ η πίεση λειτουργίας σε Pa.

Κατά την διερεύνηση του κώδικα και κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγινε έρευνα σε τρόπους επίλυσης γραμμικών συστημάτων της μορφής $A \cdot x = B$. Εξετάστηκαν οι επαναληπτικές μέθοδοι **S.O.R.** και η μέθοδος των **Gauss-Seidel**. Στην μεν **S.O.R.** δεν ήταν δυνατό να βρεθεί το ιδανικό ω για την γρηγορότερη και ακριβέστερη επίλυση, στην δε μέθοδο των **Gauss-Seidel** για να φτάσουμε σε μια καλή προσέγγιση της πίεσης χρειαζόταν μεγάλη ακρίβεια και αυτό ήταν ασύμφορο από την άποψη του χρόνου, που χρειάζεται ο ηλεκτρονικός υπολογιστής για να φτάσει σε αυτήν την ακρίβεια.

2.7 Υπολογισμός φορτίων και δυνάμεων

Οι δυνάμεις και τα φορτία που υπολογίζονται σε αυτή την ενότητα προκύπτουν από την πίεση λειτουργίας που υπολογίστηκε στην προηγούμενη ενότητα. Οι δυνάμεις αυτές είναι οι δυνάμεις που χρειαζόμαστε για να ελέγξουμε την συνθήκη της ισορροπίας που πρέπει να τηρείται για να βγούμε από αυτήν την επαναληπτική μέθοδο και να προχωρήσουμε στο επόμενο βήμα της επαναληπτικής διαδικασίας.

Τα φορτία αρχικά και οι δυνάμεις αργότερα μέσω του ελέγχου της ισορροπίας μας βοηθούν στο να καταλήξουμε στην τιμή του ελάχιστου πάχους της λιπαντικής μεμβράνης. Καθώς στην αρχή κάναμε μια προσέγγιση του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης και από αυτήν προέκυψαν η πίεση λειτουργίας ,αρχικά και έπειτα τα

φορτία και οι δυνάμεις. Εάν τώρα δεν ικανοποιείται η συνθήκη ισορροπίας αλλάζει ελαφρώς η αρχική εκτίμηση για το ελάχιστο πάχος της λιπαντικής μεμβράνης και υπολογίζονται από την αρχή η πίεση τα φορτία και οι δυνάμεις, μέχρις ότου ικανοποιηθεί η συνθήκη της ισορροπίας.

Τα μεγέθη των φορτίων και των δυνάμεων δίδονται από τους τύπους:

$$W_{tot} = W_{tota} + W_{toth}$$

W_{tot} = Ολικό φορτίο επαφής

W_{tota} = Φορτίο που παραλαμβάνεται από την τραχύτητα

W_{toth} = Υδροδυναμικό φορτίο

$$F_{tot} = F_{tota} + F_{toth}$$

F_{tot} = ολική δύναμη τριβής

F_{tota} = Συνιστώσα της τριβής που οφείλεται στην παραμόρφωση της τραχύτητας

F_{toth} = υδροδυναμική συνιστώσα της τριβής

$$F_{tota} = aW_{tota} + \tau_0 \cdot A$$

Όπου: A : πραγματική επιφάνεια επαφής Greenwood

$A = \pi DL$: φαινόμενη επιφάνεια επαφής

$$W(d) = \pi(\eta\beta\sigma)^2 A [F_{5/2}(d/\sigma)]^{16/15} \sqrt{2} E_{comp} \sqrt{\sigma/\beta}$$

$$A(d) = \pi^2 (\eta\beta\sigma)^2 A [F_2(d/\sigma)]$$

$$N(d) = 4\pi(\eta\beta\sigma) A \eta [F_1(d/\sigma)]$$

Το υδροδυναμικό φορτίο δίδεται από τον τύπο:

$$W_h(t) = \iint_s P(x, y, t) X(p) ds$$

Όπου:

$$X(p) = 0 \text{ για } P < 0$$

$$X(p) = 1 \text{ για } P \geq 0$$

Το φορτίο επαφής δίνεται από τον τύπο:

$$W_a(h', t) = \frac{16}{15} \sqrt{2} \pi \times (\eta\beta\sigma)^2 \times E' \times \sqrt{\sigma/\beta} \times A \times F_{5/2}$$

Στον κώδικα τώρα οι τύποι αυτοί έχουν την εξής μορφή:

```

4 - a=1;
5 - k=0;
6 - for i=1:2:3
7 - for j=1:2:z
8 - Wh(i,j)=Rad(i,j)*Piesi(a,1)*4*dx*dy;
9 - if Wh(i,j)<0
10 - Wh(i,j)=0;
11 - end
12 - Whtot=Whtot+Wh(i,j);
13 - a=a+1;
14 - end
15 - end
16 - for i=1:z
17 - for j=1:z
18 - Wa(i,j)=F25(i,j);
19 - Watot=Watot+Wa(i,j);
20 - end
21 - end
22 - Watot=Watot*dx*dy;
23 - Watot=Watot*16*(2^0.5)*pi*(NBS^2)*Ecomp*(SB^0.5)/15;
24 - Whtot=Whtot+Watot;
25 -

```

Σχήμα 2.11: υπολογισμός φορτίων υδροδυναμικού και μη.

```
for i=3:2:z-2
```

```
for j=3:2:z-2
```

```
if(j==3)
```

```
a=a+2;
```

```
end
```

```
if(Piesi(a+1,1)<0)
```

```
k=0;
```

```
end
```

```
if(Piesi(a-1,1)<0)
```

```
k1=0;
```

```
end
```

```
Fh1=((eta*(U)/Ypsos(i,j))*(Ffs(i,j)+htt(i,j)*(Ypsos(i,j)*10^6))-  
((Ypsos(i,j)/2)*Ffp(i,j)*((k*Piesi(a+1,1)-k1*Piesi(a-1,1))/(4*dx))));
```

```
Fh2=((RMS^2-RMS1^2)/RMS^2)*((eta*(U)/Ypsos(i,j))*Ffs(i,j)-(Ffp(i,j)*Ypsos(i,j)-htt(i,j)*10^-  
6)*((k*Piesi(a+1,1)-k1*Piesi(a-1,1))/(4*dx))));
```

```
Fh=Fh+(Fh1+Fh2)*4*dx*dy;
```

a=a+1;

k=1;

k1=1;

end

end

Σχήμα 2.12:υπολογισμός υδροδυναμικής δύναμης με τους διορθωτικούς συντελεστές.

Παρατήρηση :

Στην παρούσα διπλωματική εργασία και στα πλαίσια βελτίωσης του κώδικα έγινε εισαγωγή των διορθωτικών συντελεστών ροής στον υπολογισμό της υδροδυναμικής συνιστώσας της δύναμης τριβής για πρώτη φορά σε όλο το φάσμα του πεδίου ορισμού τους και μάλιστα για 2 τραχείες επιφάνειες αντί μίας σύνθετης τραχείας επιφάνειας και μίας λείας.

2.8 Έλεγχος ισορροπίας

Σε αυτήν την ενότητα ελέγχουμε την συνθήκη της ισορροπίας ανάμεσα στα φορτία που βρέθηκαν στις προηγούμενες ενότητες και στο φορτίο που προκύπτει από την μέση ελαστική παραμόρφωση. Εάν δεν επέλθει ισορροπία γίνεται αλλαγή στην εκτίμηση που κάνουμε στην αρχή του κώδικα για το ελάχιστο πάχος λιπαντικής μεμβράνης.

Στα πλαίσια της βελτίωσης του κώδικα έγινε έρευνα για την αλλαγή που πρέπει να γίνεται σε κάθε επανάληψη της μεθόδου για γρηγορότερη σύγκλιση. Έτσι το βήμα άλλαξε και τα αποτελέσματα του ήταν αρκετά ικανοποιητικά. Ο έλεγχος γίνεται πάλι με το απόλυτο σχετικό σφάλμα που δίδεται από τον τύπο $\frac{x^{k-1}-x^k}{x^k} < \frac{1}{2} * 10^{-m}$ όπου x^{k-1} και x^k είναι το φορτίο που υπολογίστηκε στην επανάληψη αυτή και το φορτίο που προκύπτει από την μέση ελαστική παραμόρφωση αντίστοιχα. Όπου m η ακρίβεια σε σημαντικά ψηφία που στον κώδικα μας το m είναι 2,άρα το σύστημα τερματίζει την επαναληπτική μέθοδο όταν η διαφορά των φορτίων δεν είναι μεγαλύτερη από δύο σημαντικά ψηφία.


```

230 -         pr=abs((Whtot-Wtar)/Wtar);
231 -         Vhma=pr;
232 -         if pr>1
233 -             Vhma=2000*pr;
234 -         elseif pr>0.0056 && pr<1
235 -             Vhma=200*Vhma;
236 -         end
237 -         if(abs((Whtot-Wtar)/Wtar)<0.005)
238 -             break
239 -         end
240 -         if(Whtot<Wtar)
241 -             Hmin=Hmin-Vhma*Hmin*0.0005;
242 -         end
243 -         if(Whtot>Wtar)
244 -             Hmin=Hmin+Vhma*Hmin*0.0005;
245 -         end
246 -         if(Hmin<0)
247 -             Hmin=0.0000000;
248 -             break
249 -         end
250 -     end%inner while

```

Σχήμα 2.13: το κομμάτι του κώδικα όπου ελέγχεται η συνθήκη της ισορροπίας και το νέο βήμα με το οποίο αλλάζει η κάθε φορά η πρόβλεψη του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης.

```

!print*,Whtot,Wtar

if(abs((Whtot-Wtar)/Wtar)<0.02)then

exit

endif

if(Whtot<Wtar)then

Hmin=Hmin-0.00000001*Vhma

endif

if(Whtot>Wtar)then

Hmin=Hmin+0.00000001*Vhma

endif

if(Hmin<0)then

Hmin=0.0000000

exit

endif

```

Σχήμα 2.14: το παλιό βήμα με το οποίο άλλαζε η κάθε φορά η πρόβλεψη του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης.

Οι αλλαγές που έγιναν στον κώδικα σε αυτό το κομμάτι κατέστησαν τον κώδικα ταχύτερο στην σύγκλιση. Επίσης δόθηκε η ικανότητα απαίτησης μεγαλύτερης ακρίβειας κατά ένα σημαντικό ψηφίο όπως φαίνεται στα σχήματα 13 και 14. Η αλλαγή στο βήμα έκανε πιο προσιτή την μεγαλύτερη ακρίβεια αφού ο αριθμός επαναλήψεων μέχρι να φτάσουμε στην επιθυμητή ακρίβεια παραμένει μικρότερος με το νέο βήμα αλλαγής από ότι ήταν το παλιό βήμα με μικρότερη ακρίβεια.

2.9 Συγκέντρωση ,αποθήκευση ,σχεδίαση αποτελεσμάτων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται ίσως η σημαντικότερη από πρακτικής άποψης που έγινε στον κώδικα με γνώμονα πάντα την βελτίωση του. Αφορά στα αποτελέσματα της προσομοίωσης ,το οποίο είναι το κομμάτι του κώδικα που μας ενδιαφέρει περισσότερο και τα χρειαζόμαστε έτσι ώστε να μπορέσουμε να προβάλουμε να συγκρίνουμε και να μελετήσουμε το τριβολογικό φαινόμενο στην επιφάνεια επαφής δακτυλίου χιτωνίου.

Στον κώδικα που είχαμε μέχρι ,να γίνει η παρούσα διπλωματική γινόταν, χρήση της γλώσσας προγραμματισμού fortran για να γίνεται η θεωρητική προσομοίωση. Η γλώσσα της fortran αποτελεί ένα πολύ βασικό εργαλείο για τον μηχανολόγο μηχανικό ικανότατο για τους υπολογισμούς. Όμως δεν δίνει την δυνατότητα εύκολης επικοινωνίας με άλλα προγράμματα που είναι φιλικότερα προς τον χρήστη όπως είναι τα Microsoft Office. Γι αυτό τον λόγο έγινε αλλαγή του κώδικα από την γλώσσα της fortran στην γλώσσα προγραμματισμού matlab. Η matlab πέρα από το ότι είναι μια πιο σύγχρονη γλώσσα προγραμματισμού ,δίνει και τη δυνατότητα αμεσότερης επικοινωνίας με τα Microsoft Office και έτσι γίνεται πιο εύκολη η αναπαράσταση και μελέτη των αποτελεσμάτων.

Η διαδικασία που ακολουθήσαμε στην fortran αποτελούνταν από πέντε βήματα:

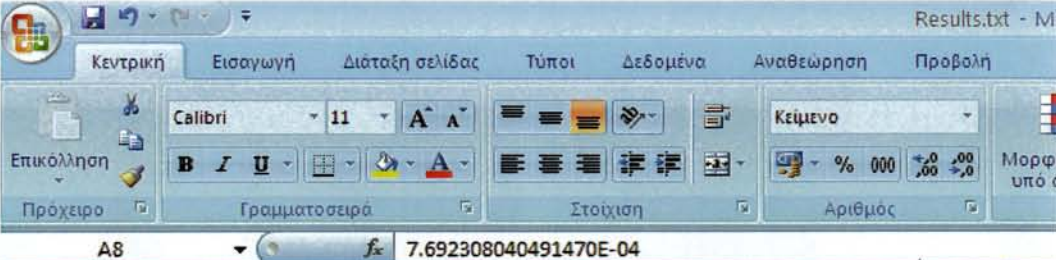
1. Τρέξιμο του κώδικα και υπολογισμός των αποτελεσμάτων

select Επεξεργασία κληρωμένων αρχείων 24-9.exe			
7.692308840491470E-004	13.9112613017058	2290	0
2.06759768388789	13.9573955799633	2289	5
4.10833852237443	13.9573955799633	2289	10
6.09621778325381	13.9573955799633	2289	15
7.98924762208783	13.5024007938643	2299	20
9.74441236355098	13.0612602920070	2309	25
11.3659740626500	12.6335831170423	2319	30
12.8189821419397	11.8171054571728	2339	35
14.0788291549551	11.4275728770412	2349	40
15.1977655353487	11.0500389695862	2359	45
16.1318120446919	10.6841611942429	2369	50
16.8774047237258	10.3296060145049	2379	55
17.4319880533061	9.98604867771392	2389	60
17.8689893076002	9.98604867771392	2389	65
18.1227046962944	9.98604867771392	2389	70
18.1994910574959	9.98604867771392	2389	75
18.1073661123206	9.98604867771392	2389	80
17.8566368539735	9.98604867771392	2389	85
17.4594492358871	9.98604867771392	2389	90
16.9293846647370	9.98604867771392	2389	95
16.2818358209398	9.98604867771392	2389	100
15.5295747827510	9.98604867771392	2389	105
14.6903264886574	9.98604867771392	2389	110
13.7783602359436	9.98604867771392	2389	115
12.8598114837564	10.3296060145049	2379	120
11.8881606995193	10.6841611942429	2369	125
10.8756793112971	11.0500389695862	2359	130
9.83276242773142	11.4275728770412	2349	135
8.76828756481335	11.8171054571728	2339	140
7.68948430625409	12.2189884676243	2329	145
6.60187220800770	12.6335831170423	2319	150
5.50926824524105	13.0612602920070	2309	155
4.41386285754553	13.5024007938643	2299	160
3.30205852906903	13.5024007938643	2299	165
2.20700321674994	13.9573955799633	2289	170
1.10710074389505	14.4266460101998	2279	175
7.8954673229873999E-004	14.9105640989740	2269	180
7.8954673229873999E-004	-14.9105640989740	2269	180
-1.16904424056533	-14.9105640989740	2269	185
-2.34085621913292	-14.9105640989740	2269	190
-3.51783047233032	-14.9105640989740	2269	195
-4.70162291515744	-14.9105640989740	2269	200
-5.89281692632140	-14.9105640989740	2269	205
-7.09062743736481	-14.9105640989740	2269	210
-8.29265530450983	-14.9105640989740	2269	215
-9.49470147742680	-14.9105640989740	2269	220
-10.6906485803924	-14.9105640989740	2269	225
-11.8724153761795	-14.9105640989740	2269	230
-12.9730386226945	-14.4266460101998	2279	235
-14.0095178232901	-14.4266460101998	2279	240
-15.1568366031727	-14.4266460101998	2279	245
-16.1600415827177	-14.4266460101998	2279	250
-17.0088697628214	-13.9573955799633	2289	255
-17.8317642357842	-13.9573955799633	2289	260
-18.5418663997826	-13.9573955799633	2289	265
-19.1224179849487	-13.9573955799633	2289	270
-19.5574363972571	-13.9573955799633	2289	275
-19.8320466385957	-13.9573955799633	2289	280
-19.9329458882452	-13.9573955799633	2289	285
-19.8488454428089	-13.9573955799633	2289	290
-19.5708762992424	-13.9573955799633	2289	295
-19.0929455812654	-13.9573955799633	2289	300
-18.4120323176036	-13.9573955799633	2289	305
-17.5284127420834	-13.9573955799633	2289	310
-16.4458072594291	-13.9573955799633	2289	315
-15.1714434112581	-13.9573955799633	2289	320
-13.7160316242106	-13.9573955799633	2289	325
-12.0936529418308	-13.9573955799633	2289	330

2. Αντιγραφή των αποτελεσμάτων από την fortran και επικόλλησής τους σε ένα αρχείο notepad και αποθήκευσής τους σαν ένα αρχείο με κατάληξη .txt .

Results.txt - Notepad			
File	Edit	Format	View Help
7.692308040491470E-004	13.9112613017858	2290	0
2.06759768388789	13.9573955799633	2289	5
4.10833852237443	13.9573955799633	2289	10
6.09621778325381	13.9573955799633	2289	15
7.98924762208783	13.5024007938643	2299	20
9.74441236355098	13.0612602920070	2309	25
11.3659740626500	12.6335831170423	2319	30
12.8189021419397	11.8171054571728	2339	35
14.0788291549551	11.4275728778412	2349	40
15.1977655353487	11.0500389695862	2359	45
16.1318120446919	10.6841611942429	2369	50
16.8774047237258	10.3296060145049	2379	55
17.4319880533061	9.98604867771392	2389	60
17.8689093076002	9.98604867771392	2389	65
18.1227046962944	9.98604867771392	2389	70
18.1994910574959	9.98604867771392	2389	75
18.1073661123206	9.98604867771392	2389	80
17.8566368539735	9.98604867771392	2389	85
17.4594492358871	9.98604867771392	2389	90
16.9293846647370	9.98604867771392	2389	95
16.2810358209398	9.98604867771392	2389	100
15.5295747827510	9.98604867771392	2389	105
14.6903264886574	9.98604867771392	2389	110
13.7783602359436	9.98604867771392	2389	115
12.8598114837564	10.3296060145049	2379	120
11.8881606995193	10.6841611942429	2369	125
10.8756793112971	11.0500389695862	2359	130
9.83276242773142	11.4275728778412	2349	135
8.76828756481335	11.8171054571728	2339	140
7.68948430625409	12.2189884676243	2329	145
6.60187220800770	12.6335831170423	2319	150
5.50926824524105	13.0612602920070	2309	155
4.41386285754553	13.5024007938643	2299	160
3.30205852906903	13.5024007938643	2299	165
2.20700321674994	13.9573955799633	2289	170
1.10710074389505	14.4266460101998	2279	175
7.895467329873999E-004	14.9105640989740	2269	180
7.895467329873999E-004	-14.9105640989740	2269	180
-1.16904424056533	-14.9105640989740	2269	185
-2.34085621913292	-14.9105640989740	2269	190
-3.51783047233032	-14.9105640989740	2269	195
-4.70162291515744	-14.9105640989740	2269	200
-5.89281692632140	-14.9105640989740	2269	205
-7.09062743736481	-14.9105640989740	2269	210
-8.29265530450983	-14.9105640989740	2269	215
-9.49470147742680	-14.9105640989740	2269	220
-10.6906485803924	-14.9105640989740	2269	225
-11.8724153761795	-14.9105640989740	2269	230
-12.9730386226945	-14.4266460101998	2279	235
-14.0895178232901	-14.4266460101998	2279	240
-15.1568366031727	-14.4266460101998	2279	245
-16.1600415827177	-14.4266460101998	2279	250
-17.0088697628214	-13.9573955799633	2289	255
-17.8317642357842	-13.9573955799633	2289	260
-18.5418663997826	-13.9573955799633	2289	265
-19.1224179849487	-13.9573955799633	2289	270
-19.5574363972571	-13.9573955799633	2289	275
-19.8320466385957	-13.9573955799633	2289	280
-19.9329458882452	-13.9573955799633	2289	285
-19.8488454428089	-13.9573955799633	2289	290
-19.5708762992424	-13.9573955799633	2289	295
-19.0979455817654	-13.9573955799633	2289	300

3. Άνοιγμα του αρχείου txt, με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης , μέσω του Excel



Results.txt - Mi

Κεντρική Εισαγωγή Διάταξη σελίδας Τύποι Δεδομένα Αναθεώρηση Προβολή

Επικόλληση Πρόχειρο Γραμματοσειρά Στοιχισμός Αριθμός

Calibri 11 A A

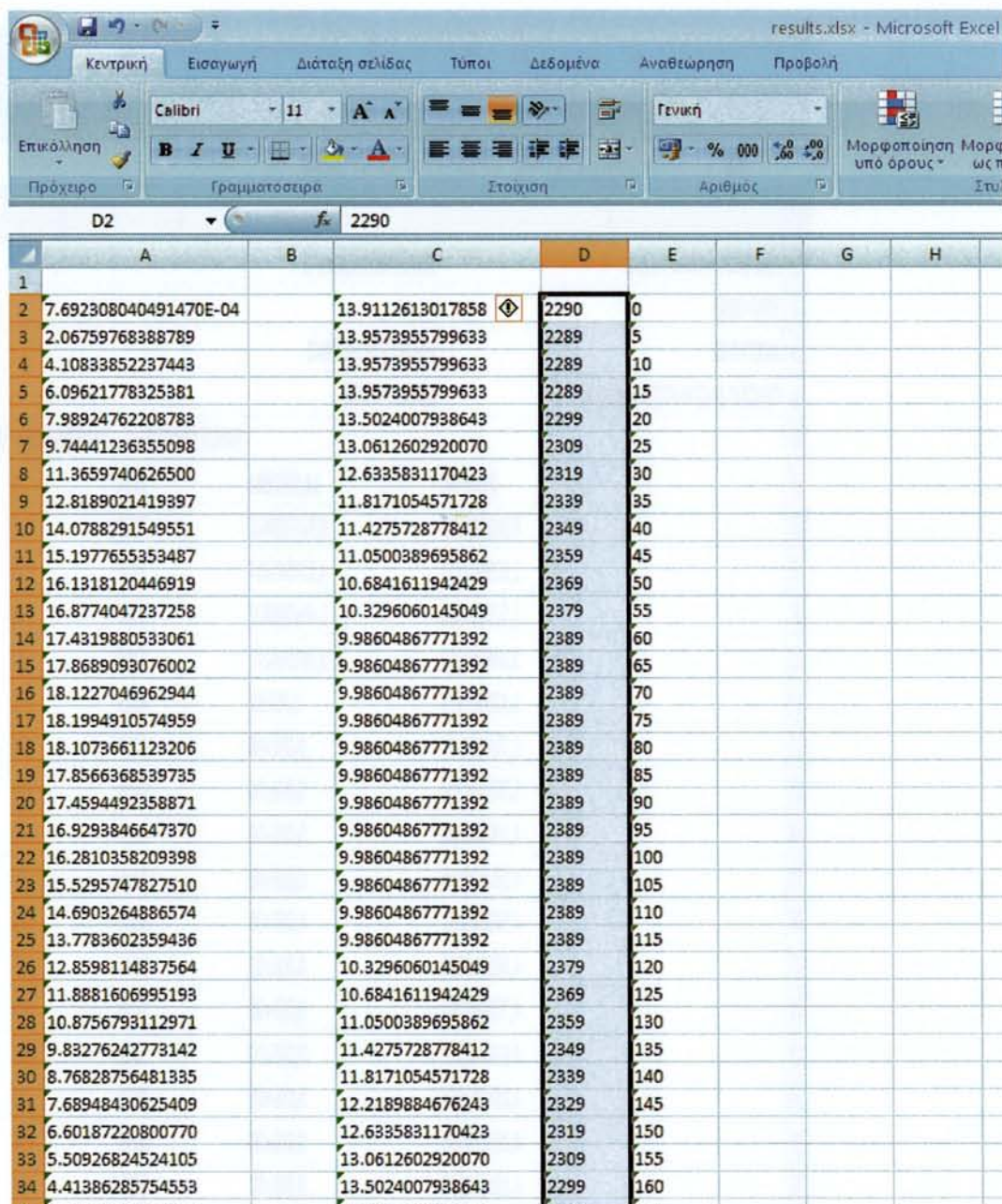
Κείμενο % 000 0.00 0.0

Μορφή υπό ό

A8 7.692308040491470E-04

	A	B	C	D	E
1	PLEASE MASTER .. GIVE	ME	THE TYPE OF YOUR FRING : 1 (FIRE)		, 2 (), 3 ()
2	1				
3	MASTER, YOU ASKED ME	TO	RUN OILFILM CODE	RING number	1
4	PLEASE MASTER .. GIVE	ME	ROUGH SURFACE CHISTICS: 1 (BRAND		NEW), 2 (RUNN
5					
6	NG IN), 3 (USED AND W	ORN)			
7	1				
8	7.692308040491470E-04		13.9112613017858	2290	0
9	2.06759768388789		13.9573955799633	2289	5
10	4.10833852237443		13.9573955799633	2289	10
11	6.09621778325381		13.9573955799633	2289	15
12	7.98924762208783		13.5024007938643	2299	20
13	9.74441236355098		13.0612602920070	2309	25
14	11.3659740626500		12.6335831170423	2319	30
15	12.8189021419397		11.8171054571728	2339	35
16	14.0788291549551		11.4275728778412	2349	40
17	15.1977655353487		11.0500389695862	2359	45
18	16.1318120446919		10.6841611942429	2369	50
19	16.8774047237258		10.3296060145049	2379	55
20	17.4319880533061		9.98604867771392	2389	60
21	17.8689093076002		9.98604867771392	2389	65
22	18.1227046962944		9.98604867771392	2389	70
23	18.1994910574959		9.98604867771392	2389	75
24	18.1073661123206		9.98604867771392	2389	80
25	17.8566368539735		9.98604867771392	2389	85
26	17.4594492358871		9.98604867771392	2389	90
27	16.9293846647370		9.98604867771392	2389	95
28	16.2810358209398		9.98604867771392	2389	100
29	15.5295747827510		9.98604867771392	2389	105
30	14.6903264886574		9.98604867771392	2389	110
31	13.7783602359436		9.98604867771392	2389	115
32	12.8598114837564		10.3296060145049	2379	120
33	11.8881606995193		10.6841611942429	2369	125

4. Το αρχείο που ανοίξαμε δεν μπορεί να αποθηκευτεί από μόνο του για αυτό ανοίγουμε ένα ακόμα αρχείο Excel στο οποίο αντιγράφουμε τα νούμερα από το προηγούμενο βήμα και το αποθηκεύουμε σαν ένα αρχείο με κατάληξη .xls.



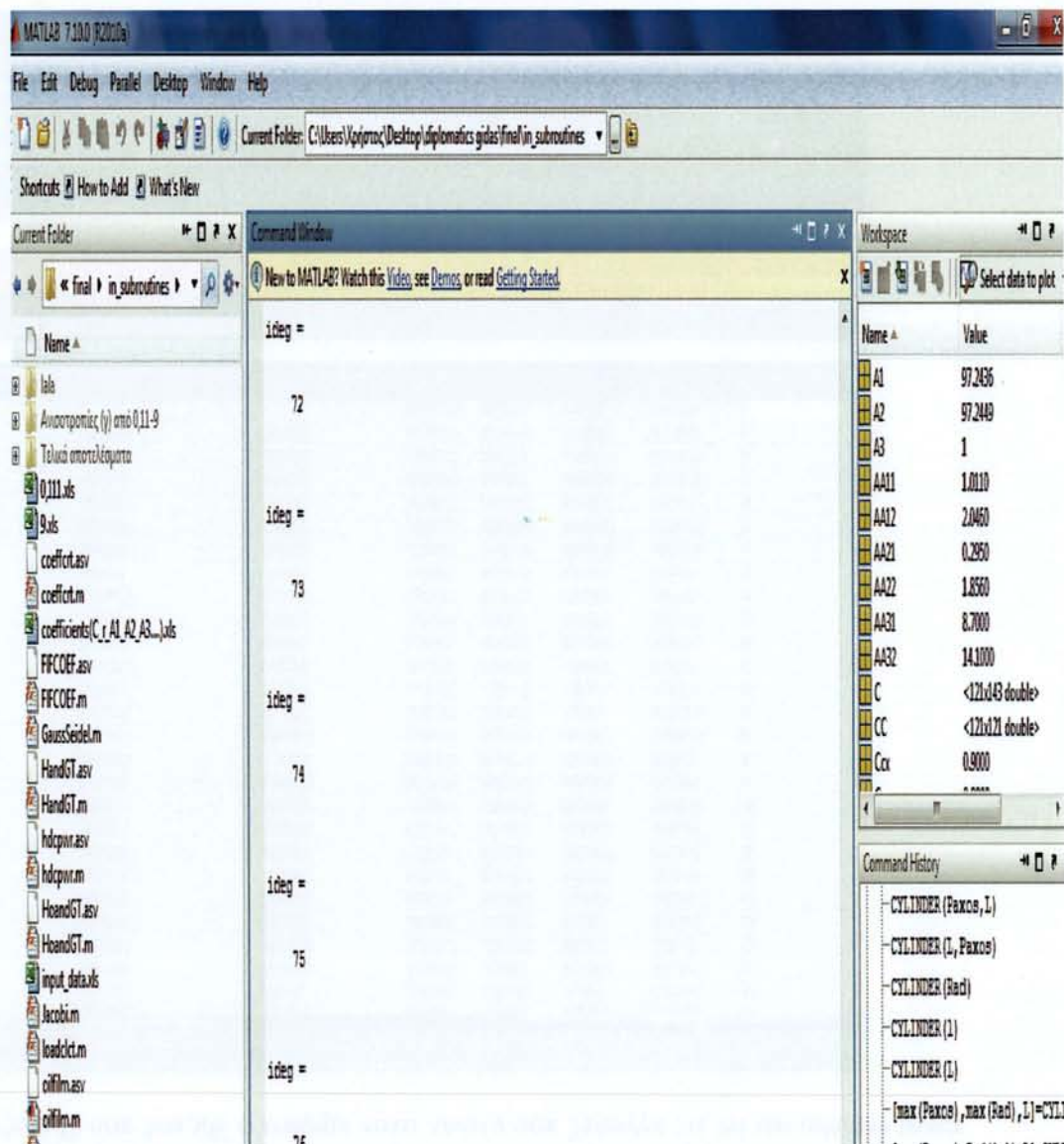
	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2	7.692308040491470E-04		13.9112613017858	2290	0			
3	2.06759768388789		13.9573955799633	2289	5			
4	4.10833852237443		13.9573955799633	2289	10			
5	6.09621778325381		13.9573955799633	2289	15			
6	7.98924762208783		13.5024007938643	2299	20			
7	9.74441236355098		13.0612602920070	2309	25			
8	11.3659740626500		12.6335831170423	2319	30			
9	12.8189021419397		11.8171054571728	2339	35			
10	14.0788291549551		11.4275728778412	2349	40			
11	15.1977655353487		11.0500389695862	2359	45			
12	16.1318120446919		10.6841611942429	2369	50			
13	16.8774047237258		10.3296060145049	2379	55			
14	17.4319880533061		9.98604867771392	2389	60			
15	17.8689093076002		9.98604867771392	2389	65			
16	18.1227046962944		9.98604867771392	2389	70			
17	18.1994910574959		9.98604867771392	2389	75			
18	18.1073661123206		9.98604867771392	2389	80			
19	17.8566368539735		9.98604867771392	2389	85			
20	17.4594492358871		9.98604867771392	2389	90			
21	16.9293846647370		9.98604867771392	2389	95			
22	16.2810358209398		9.98604867771392	2389	100			
23	15.5295747827510		9.98604867771392	2389	105			
24	14.6903264886574		9.98604867771392	2389	110			
25	13.7783602359436		9.98604867771392	2389	115			
26	12.8598114837564		10.3296060145049	2379	120			
27	11.8881606995193		10.6841611942429	2369	125			
28	10.8756793112971		11.0500389695862	2359	130			
29	9.83276242773142		11.4275728778412	2349	135			
30	8.76828756481335		11.8171054571728	2339	140			
31	7.68948430625409		12.2189884676243	2329	145			
32	6.60187220800770		12.6335831170423	2319	150			
33	5.50926824524105		13.0612602920070	2309	155			
34	4.41386285754553		13.5024007938643	2299	160			

5. Στο αρχείο που αποθηκεύσαμε επεξεργαζόμαστε τα αποτελέσματα και δημιουργούμε τα διαγράμματα που μας χρειάζονται .

Επικόλληση						Συγχώνευση και στοίχιση στο κέντρο						Μορφοποίηση Μορφή υπό όρους																							
Πράχειρο						Γραμματοσειρά						Στοίχιση						Αριθμός						Στυλ											
O6						fx						=PI()*1,5*(10^-3)*89*(10^-3)*200000																							
A						B						C						D						E						F					
1 ΚΩΔΙΚΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ R841						ΚΥΒΙΣΜΟΣ:1650cm^2																													
2 RPM=3000																																			
3 ΔΑΚΤΥΛΙΟΣ						ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΦΘΟΡΑΣ																													
4 ΠΡΩΤΟΣ ΔΑΚΤΥΛΙΟΣ(ΤΗΣ ΦΩΤΙΑΣ)						1(ΚΑΙΝΟΥΡΓΙΟ)																													
5												ΠΑΧΟΣ ΛΑΔΙΟΥ(nm)						ΓΩΝΙΑ(ΜΟΙΡΕΣ)						ΠΑΧΟΣ ΛΑΔΙΟΥ(μm)											
6 0,00E+00						14,9002651						2900						0						2,9											
7 0,963166372						8,931238442						3030						5						3,03											
8 1,829938511						4,324545454						3210						10						3,21											
9 2,525086104						1,496036822						3469						15						3,469											
10 3,048069162						0,281014271						3799						20						3,799											
11 3,423047677						1,76E-04						4179						25						4,179											
12 3,724858211						0,00E+00						4539						30						4,539											
13 3,975333302						0,00E+00						4859						35						4,859											
14 4,198649236						0,00E+00						5119						40						5,119											
15 4,382935906						0,00E+00						5339						45						5,339											
16 4,543057011						0,00E+00						5509						50						5,509											
17 4,665565195						0,00E+00						5649						55						5,649											
18 4,755061744						0,00E+00						5759						60						5,759											
19 4,814342521						0,00E+00						5839						65						5,839											
20 4,854192617						0,00E+00						5879						70						5,879											
21 4,860198508						0,00E+00						5899						75						5,899											
22 4,836128698						0,00E+00						5899						80						5,899											
23 4,768457992						0,00E+00						5899						85						5,899											
24 4,416953306						0,00E+00						5879						90						5,879											
25 4,226582207						0,00E+00						5700						05						5,700											

Η διαδικασία που ακολουθείτε πλέον αποτελείται μόνο από δύο βήματα:

1. Τρέξιμο του κώδικα και υπολογισμός των αποτελεσμάτων σε περιβάλλον Matlab



- Άμεση αντιγραφή των αποτελεσμάτων σε ένα αρχείο Excel με κατάληξη .xls το οποίο είναι έτοιμο από πριν ως πρότυπο με έτοιμα διαγράμματα που μας ενδιαφέρουν. Κάθε φορά που τρέχουμε τον κώδικα αλλάζουνε μόνα τους τα διαγράμματα.

Simulation Data									
	net	ring	wear state	curve radius	Absolute Viscosity (Pa*s)	average pressure (Pa)	rotation frequency (rpm)	time elapsed (s)	
	21	1	1	0,04	0,006		200000	3000	13,17276339
Crank Angle(o)	F _x (N)	F _y (N)	F _z (N)	H _{min} (μm)	F _{vis} *U (=ισχύς)	(Absolute Viscosity*U/W _{vis}) ^{1/4} h _{min}	F _{vis} /pi*D*L*P _{vis} (μ)	1/H _{min}	F _{vis} /
0	-4,33681E-19	15,8293847	15,8293847	2,471707947	0	0	0,163592521	0,404578543	0,00
5	-0,054942736	15,8293847	15,77444196	2,471707947	1,802389528	0,018678309	0,163024702	0,404578543	0,00
10	-0,11141874	15,8293847	15,71834282	2,471707947	3,816513909	0,03722437	0,162443809	0,404578543	0,00
15	-0,175901695	15,67886411	15,50266242	2,476335755	5,6139505136	0,055576904	0,160219039	0,403822461	0,00
20	-0,23315952	15,60014504	15,36688552	2,478772546	7,348016157	0,073506858	0,158813747	0,403425478	0,00
25	-0,276162503	15,4296746	15,14780496	2,484268085	8,95125635	0,091029763	0,156548574	0,402533046	0,00
30	-0,313427597	15,1573162	14,74230402	2,486882237	10,30666153	0,108200035	0,152357828	0,400659929	0,0
35	-0,353042028	14,90243946	14,34893743	2,500886718	11,66848964	0,12436973	0,15036419	0,399858175	0,00
40	-0,384845349	14,53790564	14,15306029	2,512828101	12,7014613	0,140041005	0,14626815	0,39795795	0,00
45	-0,405505309	14,12043501	13,7148297	2,526852427	13,5563138	0,154911392	0,141740185	0,395749269	0,00
50	-0,412381391	13,43732752	13,02494533	2,53565777	13,956285	0,169402849	0,134650918	0,392055732	0,00
55	-0,42462232	13,25841234	12,82879002	2,557079452	14,68292605	0,181600684	0,132582165	0,391071149	0,0
60	-0,435535301	12,84889515	12,42454212	2,572050809	15,09163551	0,193113555	0,128288855	0,388794793	0,00
65	-0,437930668	12,4477654	12,01043473	2,587228991	15,21877976	0,203285609	0,124124679	0,386513913	0,0
70	-0,445388361	12,30512321	11,85973485	2,592729165	15,58114673	0,211218156	0,122567235	0,385694861	0,00
75	-0,44180233	11,96461857	11,52281724	2,606382394	15,56087745	0,218229916	0,119985391	0,383717657	0,00
80	-0,446476017	11,89933755	11,45286153	2,60864699	15,76848405	0,222714342	0,118362307	0,383394943	0,00
85	-0,448668479	11,84558698	11,396911851	2,610837001	15,87262938	0,225471603	0,11778415	0,383018932	0,00
90	-0,448833919	11,83859293	11,38875961	2,61111773	15,92158537	0,226353388	0,11769883	0,382977753	0,00
95	-0,448372099	11,83859293	11,39022093	2,61111773	15,86276646	0,225488242	0,117734932	0,382977753	0,00
100	-0,444012549	11,83859293	11,39458038	2,61111773	15,68718751	0,222907082	0,117759886	0,382977753	0,00
105	-0,436787999	11,83859293	11,40185494	2,61111773	15,39591556	0,218629634	0,11783465	0,382977753	0,00
110	-0,431515643	11,9617189	11,53020566	2,606198145	15,14620877	0,212287808	0,119161817	0,38370068	0,00
115	-0,43298711	12,3096194	11,89763229	2,581796771	15,07397921	0,20906468	0,122858895	0,383841653	0,00
120	-0,42223597	12,48091298	12,05867701	2,585960665	14,59816146	0,194120355	0,124625325	0,386703484	0,00
125	-0,417402773	12,8817725	12,47431223	2,570498011	14,2837669	0,182513941	0,128918731	0,389029673	0,00
130	-0,418624212	13,24798170	13,00109227	2,52492110	13,920110	0,169611863	0,132819148	0,391100069	0,00

Είναι φανερό ότι με τις αλλαγές που έγιναν στον κώδικα ο χρόνος που χρειαζόμαστε για να έχουμε αποτελέσματα έτοιμα προς επεξεργασία μειώθηκε αισθητά έτσι πλέον είναι πιο εύκολο να μελετήσουμε το τριβολογικό φαινόμενο.

Ανακεφαλαιώνοντας τα σημαντικότερα σημεία του κώδικα ,του οποίου τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο ,αξίζει να σημειωθεί η αντικατάσταση της ποσότητας h^3 που εμφανίζεται στην εξίσωση του Reynolds με την αντίστοιχη ποσότητα Φ_x ,διορθώνοντας δηλαδή τις ποσότητες των όγκων με τον αντίστοιχο διορθωτικό συντελεστή ροής .

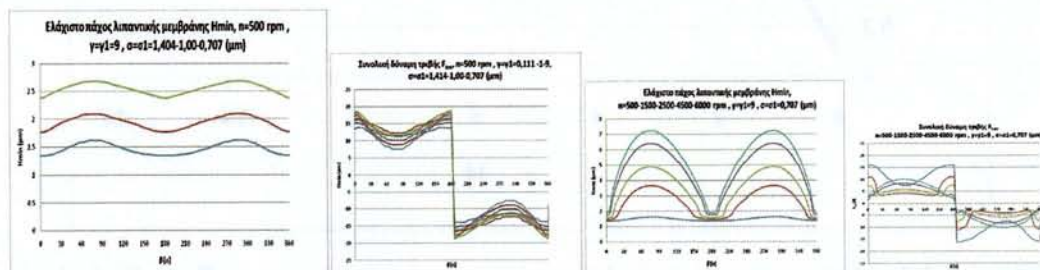
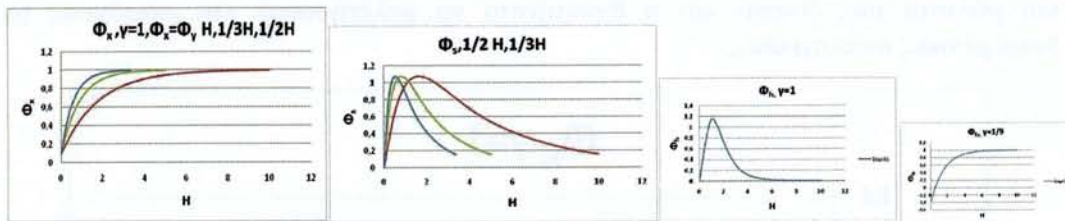
Όμως αντίστοιχα λεπτομερής αναφορά στο πάχος της λιπαντικής μεμβράνης που έχει στατιστικά χαρακτηριστικά όπως αυτό φαίνεται στο δεξί μέλος της εξίσωσης

Reynolds όπου λαμβάνεται υπ όψη η μαθηματική ελπίδα της τοπικής τιμής του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης. Ιδιαίτερη αναφορά δεν γίνεται καθότι το θέμα αποτελεί αντικείμενο άλλης διπλωματικής εργασίας κατά την οποία θα διερευνηθεί πως και σε πιο ποσοστό η στατιστική τιμή του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης επηρεάζει την λειτουργία του συστήματος.

Η επίδραση της τιμής αυτής και λοιπών χαρακτηριστικών που υπολογίζονται από τον κώδικα oilfilm δεν έχει αποτιμηθεί ακόμη ούτε έχει γίνει μελέτη για το βέλτιστο χαρακτηριστικό της τραχείας επιφάνειας που θα παρέχει ευνοϊκότερες συνθήκες λίπανσης. Τόσο κατά τη διάρκεια του συστήματος σε υδροδυναμική λίπανσης ,περίπου στο μέσο της διαδρομής , όσο και στα νεκρά σημεία (άνω και κάτω) ,όπου η γραμμική ταχύτητα μηδενίζεται και αλλάζει φορά η κίνηση του εμβόλου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

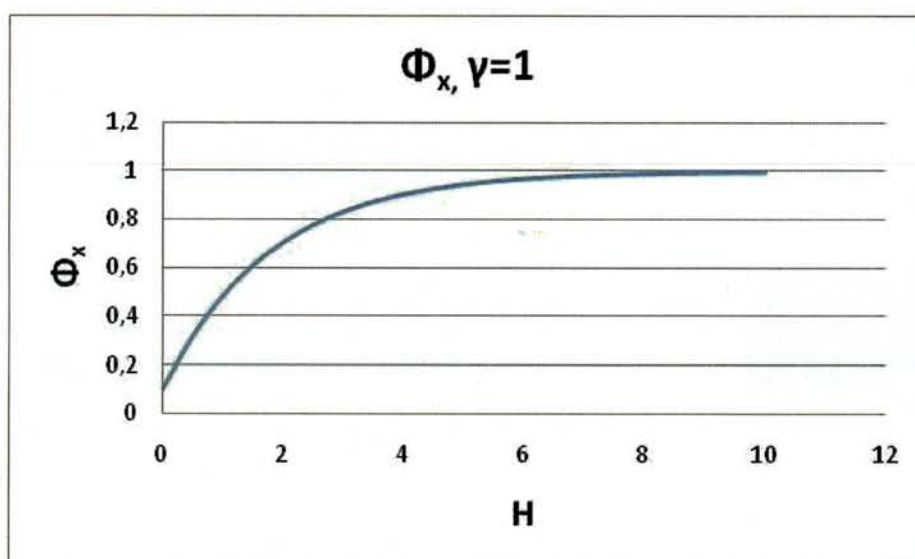
Αποτελέσματα-Διορθωτικοί συντελεστές ροής



3.1 διορθωτικοί συντελεστές ροής

Η χρήση του υπολογιστικού κώδικα oilfilm, μέχρι σήμερα, δεν έχει επεκταθεί σε μία ευρύτερη εφαρμογή του για δύο τραχείες επιφάνειες (χιτωνίου-δακτυλίου) όπως επίσης δεν έχει μελετηθεί η επίδραση της ανισοτροπίας της τραχύτητας κάθε επιφάνειας. Έτσι στο κεφάλαιο που ακολουθεί γίνεται διερεύνηση λειτουργίας του κώδικα και εξαγωγής αποτελεσμάτων και στην περιοχή όπως διαφαίνεται στα διαγράμματα που ακολουθούν.

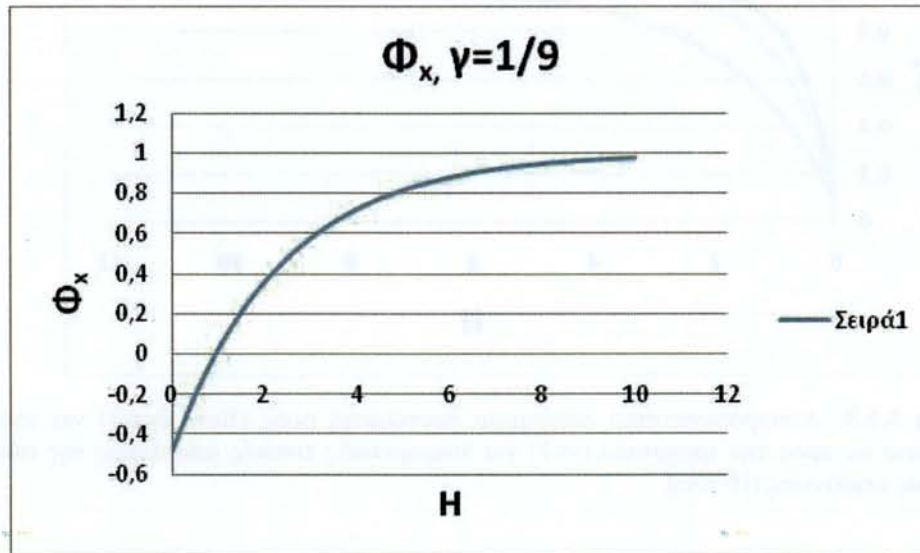
Η δημιουργία των διαγραμμάτων αυτών κατέστη δυνατή πλέον, αφού μέσα στις αλλαγές που έγιναν στον κώδικα με γνώμονα πάντα την βελτίωση του, έχουμε την δυνατότητα να εξετάσουμε και συνθήκες όπου έχουμε τραχείες και τις δύο επιφάνειες και μάλιστα μας δίνεται και η δυνατότητα να μελετήσουμε και επιφάνειες με διαφορετικές ανισοτροπίες.



Σχήμα 3.1.1: Αντιπροσωπευτικό διάγραμμα συντελεστή ροής (flow factor) για ισότροπη επιφάνεια ως προς την τραχύτητα ($\gamma=1$) συναρτήσει της παραμέτρου $H=h/\sigma$.

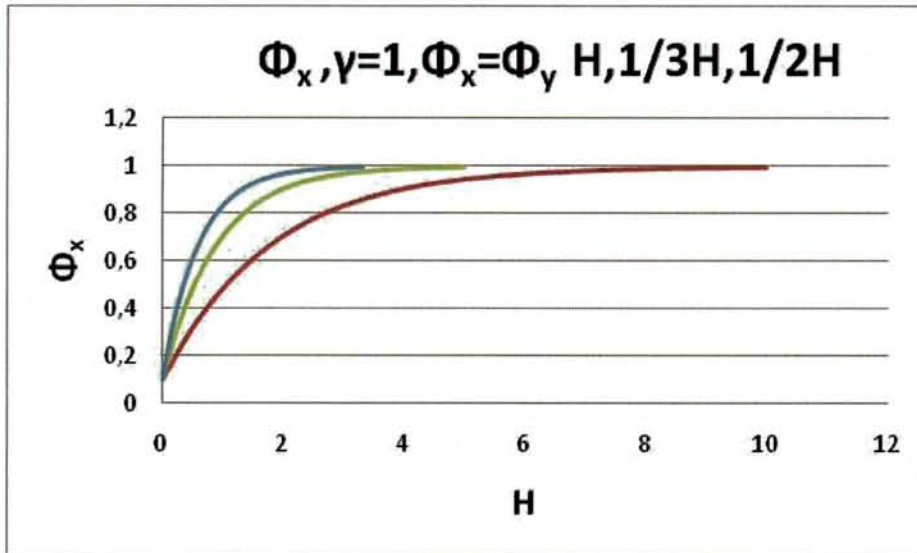
Παρατήρηση: Οι συντελεστές ροής που έχουν προκύψει από ψηφιακή προσομοίωση (Patir-Cheng) για περίπτωση εγκάρσιας ανισοτροπίας αλλά και σε περιπτώσεις ισότροπων επιφανειών ως προς την τραχύτητα (δηλαδή $\gamma < 1$ ή $\gamma = 1$) προσεγγίζουν την τιμή της μονάδας ασυμπτωτικά εκ των κάτω με σύγκλιση στην περιοχή του $H=10$. Αντιθέτως έχει αποδειχθεί θεωρητικά ότι η διόρθωση του όρου h^3 στην εξίσωση του Reynolds σε περίπτωση διαμήκουσ ανισοτροπίας $\gamma > 1$ οι αντίστοιχοι flow factors παίρνουν αρχικά τιμές μεγαλύτερες τις μονάδας για να καταλήξουν με τη σειρά τους ασυμμετρικά στην μονάδα πάλι στην τιμή $H=10$.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\Phi_x h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Phi_y h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 6\eta(u_1 - u_2) \frac{\partial h_T}{\partial x} + 6(u_1 - u_2) \frac{\partial h_T}{\partial x} \sigma_{\rho o} \frac{\partial \Phi_s}{\partial x} + 12\eta \frac{\partial h_T}{\partial t}$$



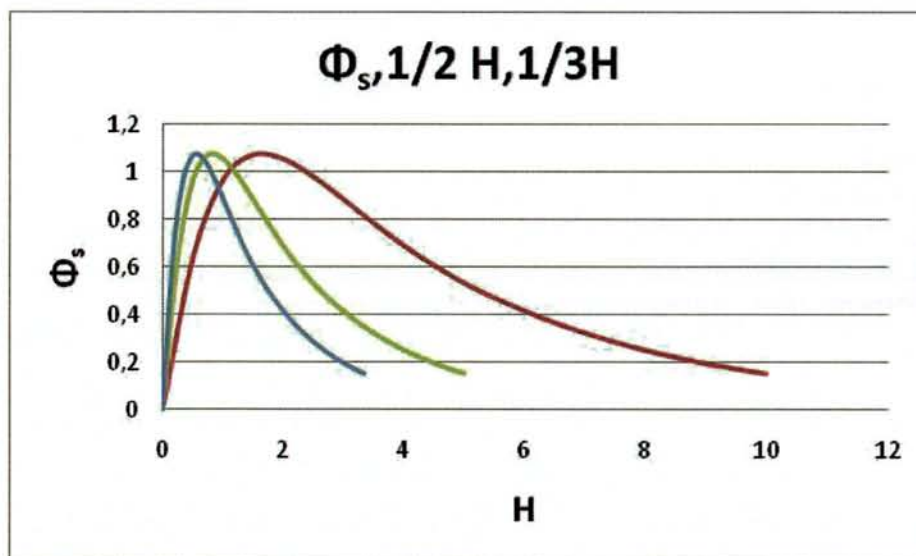
Σχήμα 3.1.2: Αντιπροσωπευτικό διάγραμμα συντελεστή ροής (flow factor) για εγκάρσια ανισοτροπή επιφάνεια ως προς την τραχύτητα ($\gamma=1/9$) συναρτήσει της παραμέτρου $H=h/\sigma$.

Οι συντελεστές ροής Φ_x, Φ_y με σχέση $\Phi_x(H, \gamma) = \Phi_y(H, 1/\gamma)$ έχουν υπολογιστεί με βάση αναλυτική φόρμουλα του Schadegger για κατανομή κανονική των υψομέτρων των σημείων. Όπου $H=h/\sigma$, σ : η τυπική απόκλιση της κατανομής αυτής. Επειδή στην πράξη η κατανομή αυτή είναι ασύμμετρη με άνω φράγμα μικρότερο κατά πολύ του 3σ π.χ. 2σ για άφθαρτες επιφάνειες και σ για στρωμένες θεωρούμε δόκιμο να γίνεται χρήση των συντελεστών αυτών βάση των αναλυτικών σχέσεων αλλά με $H=2H$ και $3H$ αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.1.3: Αντιπροσωπευτικό διάγραμμα συντελεστή ροής (flow factor) για ισότροπη επιφάνεια ως προς την τραχύτητα ($\gamma=1$) για διαφορετικές τυπικές αποκλίσεις της σύνθετης τραχείας επιφάνειας ($H=h/\sigma$).

Στην εξίσωση του Reynolds επίσης εμφανίζεται ο συντελεστής Φ_s . Ο συντελεστής αυτός οφείλει να διορθωθεί με βάση την ίδια λογική είτε για τραχεία μόνο την επιφάνεια του κυλίνδρου είτε για τραχείες και τις 2 επιφάνειες.



Σχήμα 3.1.4: Αντιπροσωπευτικό διάγραμμα συντελεστή ροής (flow factor) για ισότροπη επιφάνεια ως προς την τραχύτητα ($\gamma=1$) για διαφορετικές τυπικές αποκλίσεις της σύνθετης τραχείας επιφάνειας ($H=h/\sigma$).

Με την ίδια λογική επιβάλλεται η διόρθωση του συντελεστή Φ_s για τις δύο τραχείες επιφάνειες, λαμβανομένου υπόψη των V_{r1}, V_{r2} , $V_{r1} = \sigma_1^2 / \sigma^2$, $V_{r2} = \sigma_2^2 / \sigma^2$, $\sigma_1^2 + \sigma_2^2 = \sigma^2$, όπου σ τυπική απόκλιση κατανομής υψομέτρων σημείων.

Με τον ίδιο τρόπο διορθώνονται και οι συντελεστές Φ_{fp} και Φ_{fs} που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της υδροδυναμικής συνιστώσας της τριβής. Παράλληλα γίνεται και η διόρθωση των ολοκληρωμάτων $(H+\delta)f(\delta)d\delta$ και $(f(\delta)/H+\delta)*d\delta$.

Είναι γνωστό ότι η εξίσωση του Reynolds για λείες επιφάνειες οδηγεί στον υπολογισμό της υδροδυναμικής συνιστώσας της δύναμης τριβής με τον τύπο $\iint \tau * \eta * ds$ όπου τ_η η διατμητική τάση (στην ουσία η αντίσταση πάνω στην κινούμενη επιφάνεια) με $\tau_\eta = -\eta * U/h + h/2 * dP/dx$.

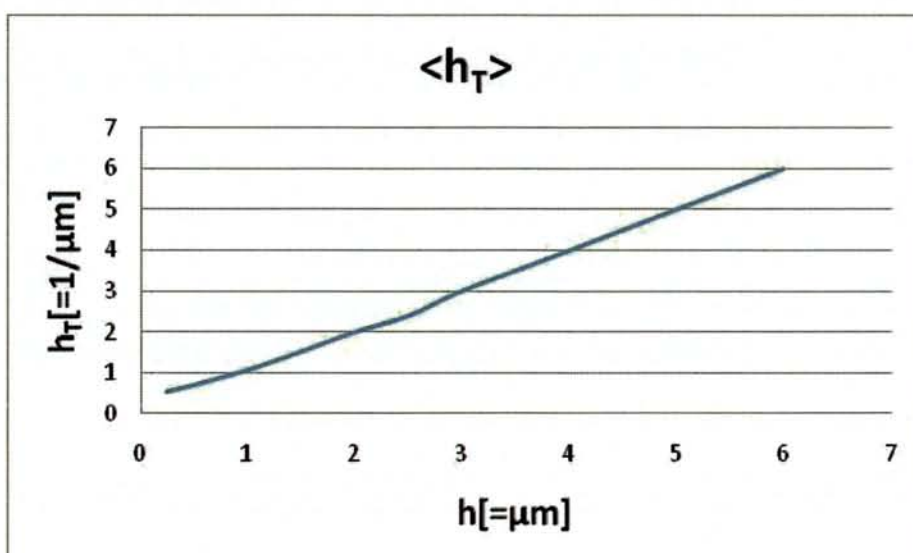
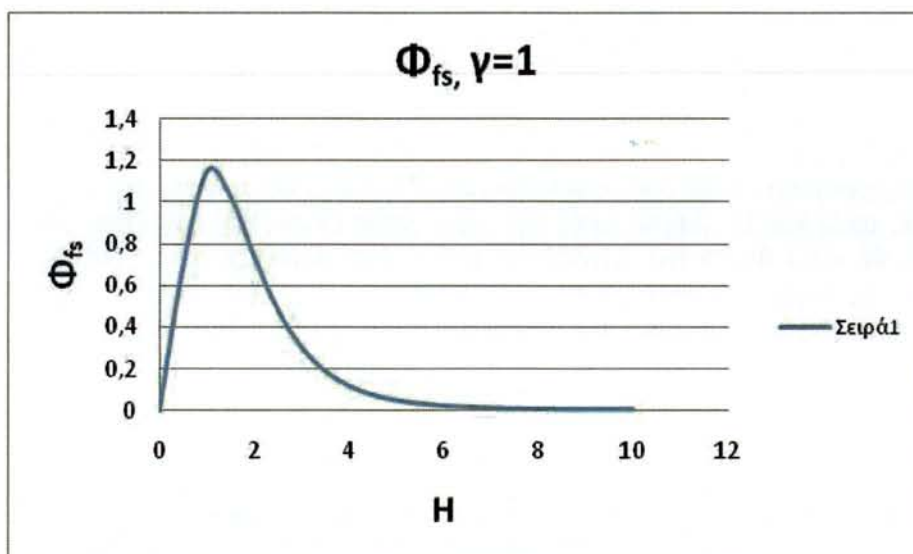
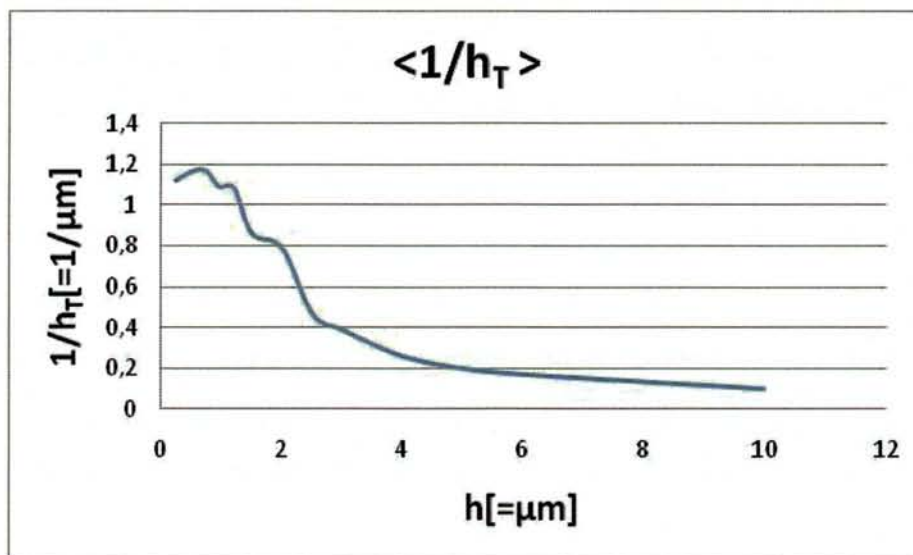
Στην γενικευμένη εξίσωση του Reynolds όμως στη συνιστώσα αυτή προστίθενται όροι ώστε να λαμβάνεται υπόψη η παρουσία της τραχύτητας τόσο σε σχέση με το πάχος της λιπαντικής μεμβράνης όσο στην επίδρασή της πάνω στις τιμές της υδροδυναμικής πίεσης. Έτσι ο προηγούμενος τύπος γίνεται $F_h = \iint (\tau_{H1} + \tau_{H2}) * ds$ όπου $\tau_{H1} = -\eta * U/h * [h * [1/h_T + \Phi_{fs}] + h/2 * dP/dx * [\Phi_{fp}]$.

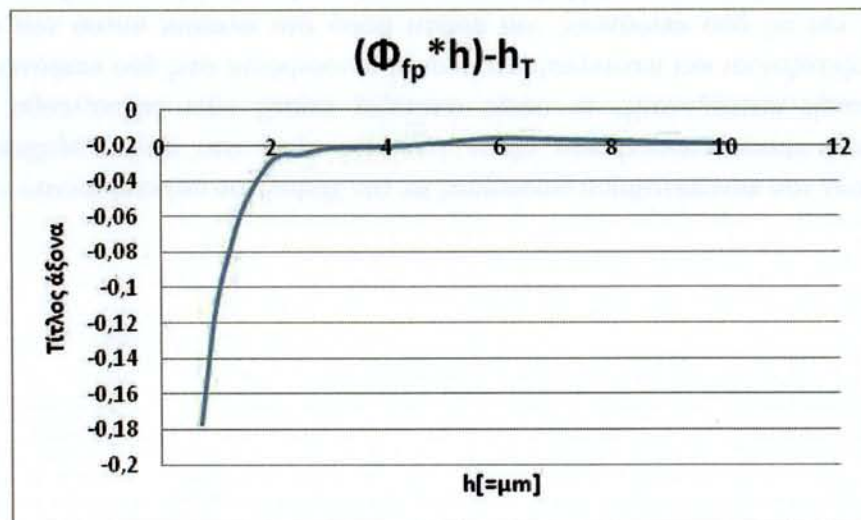
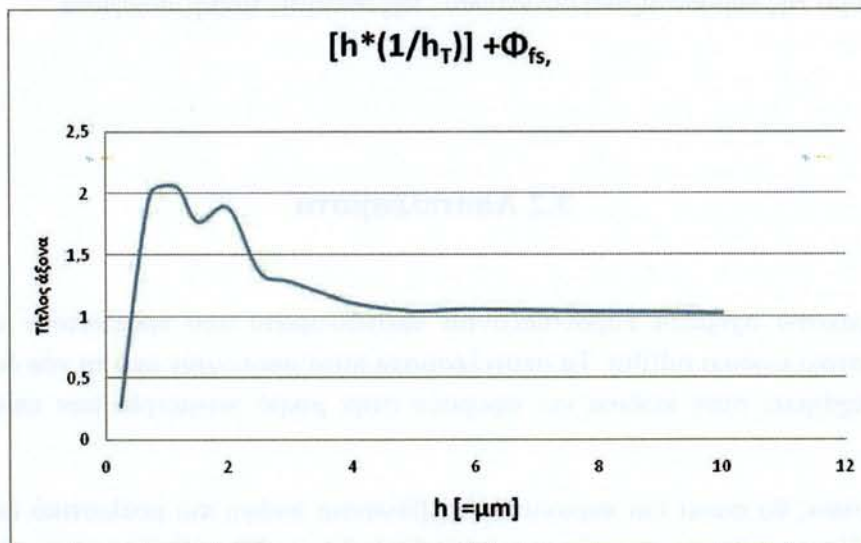
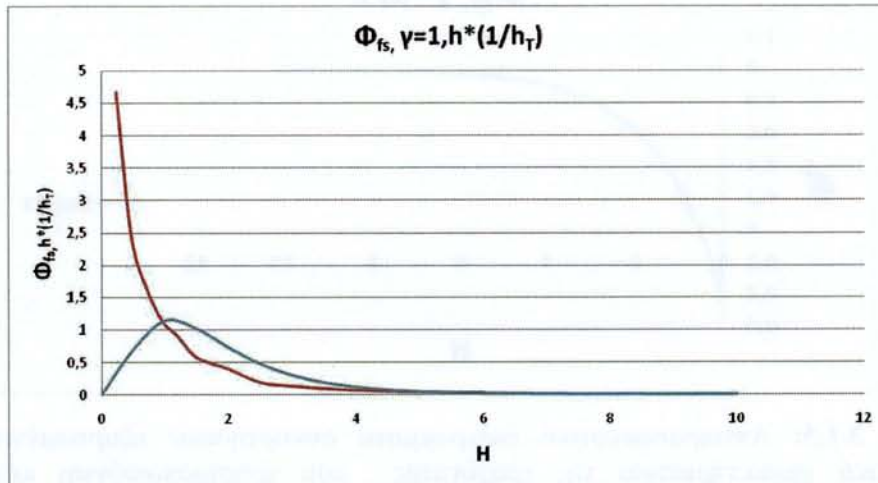
Στον τύπο αυτό για μεγάλα τιμές του h - μικρές τιμές της τραχύτητας οι διορθωτικοί συντελεστές ισούνται με την μονάδα. $\tau_{H2} = V_{r2} * [-\eta * U/h * \Phi_{fs} + h/2 * dP/dx * (\Phi_{fp} * h - h_T)]$, η τ_{H2} οφείλεται στην δράση του δακτυλίου η οποία και αυτή με την σειρά της για μεγάλες τιμές του h -μικρές τιμές της τραχύτητας όπου V_{r2} τείνει στο μηδέν αλλά κυρίως Φ_{fs} και $(\Phi_{fp} * h - h_T)$ τείνουν στο μηδέν. Για απόδειξη των προαναφερθέντων δίνουμε τις παρακάτω συναρτήσεις για τυπική απόκλιση της συνθετικής επιφάνειας $\sigma = 1 \mu m$ έτσι ώστε αριθμητικά H/σ να ισούται με την τιμή του $h [= \mu m]$ ($H = h/\sigma$).

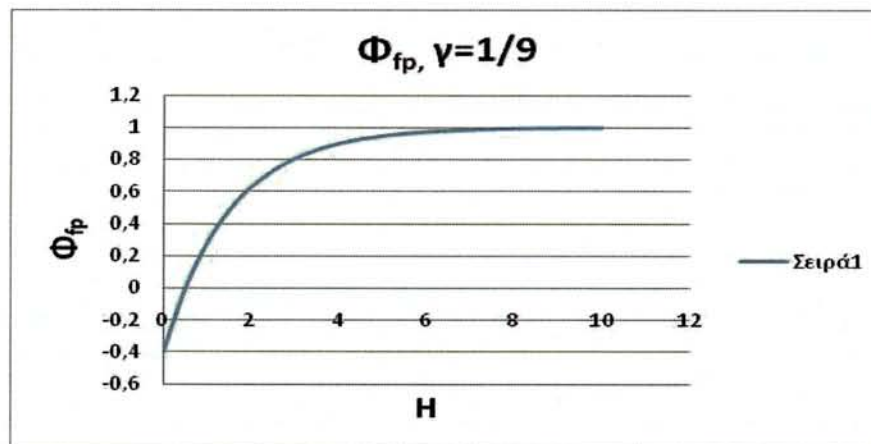
$$F_h = \iint_s (\tau_{H1} + \tau_{H2}) ds$$

Όπου :

$$\begin{aligned} \tau_{H1} &= \frac{\eta * U}{h} * \left[h * \left\langle \frac{1}{h_T} \right\rangle - \Phi_{fs} \right] - \Phi_{fp} * \frac{h}{2} * \frac{\partial p}{\partial x} \\ \tau_{H2} &= V_{r2} * \left[(\Phi_{fp} * h - h_T) * \frac{\partial p}{\partial x} + 2 * \frac{\eta * U}{h} * \Phi_{fs} \right] \\ \left\langle \frac{1}{h_T} \right\rangle &= \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{f(\sigma)}{h + \sigma} d\sigma \\ U &= U_1, U_2 = 0, V_{r2} = \frac{\sigma_2^2}{\sigma^2} \end{aligned}$$





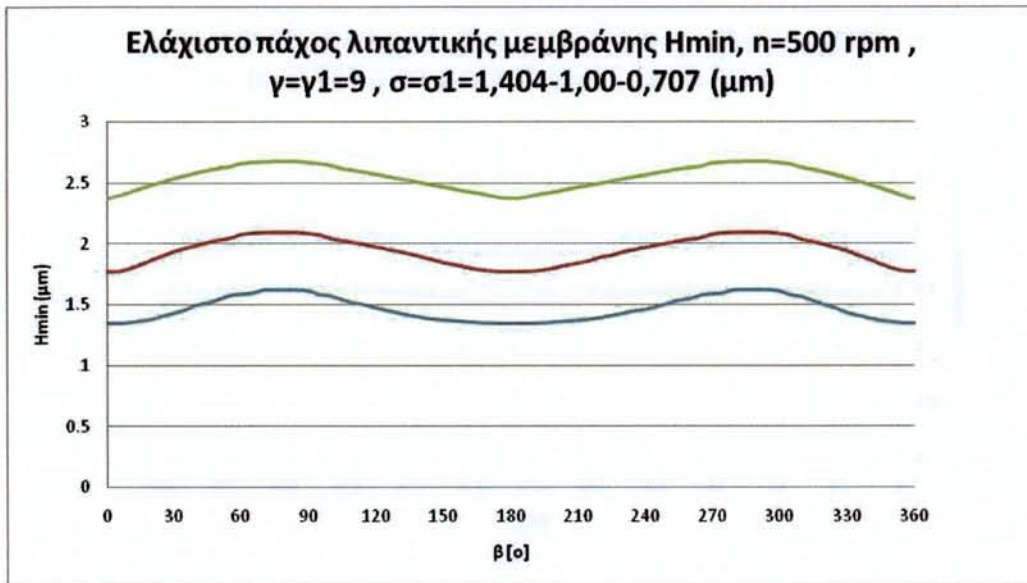


Σχήμα 3.1.5: Αντιπροσωπεφτικό διάγραμμα συναρτήσεων εξαρτωμένων από στατιστικά χαρακτηριστικά της τραχύτητας που χρησιμοποιούνται κατά τον υπολογισμό της υδροδυναμική συνιστώσας της δύναμης τριβής σύμφωνα

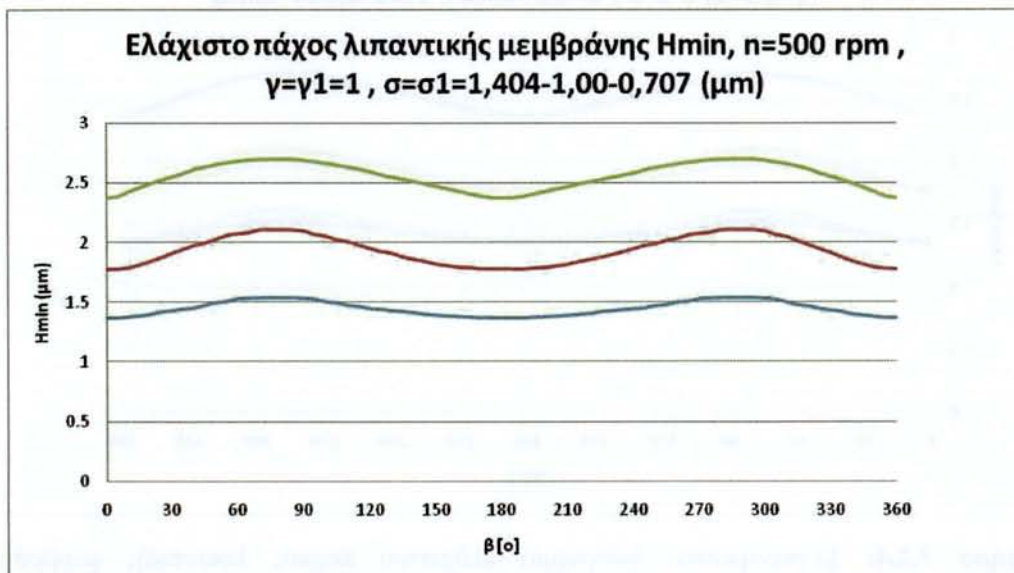
3.2 Αποτελέσματα

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται αποτελέσματα που προκύπτουν από τον υπολογιστικό κώδικα oilfilm. Τα αποτελέσματα αυτά αποτελούν από τα νέα δεδομένα που εισάχθηκαν στον κώδικα και αφορούν στην μικρό γεωμετρία των επιφανειών επαφής.

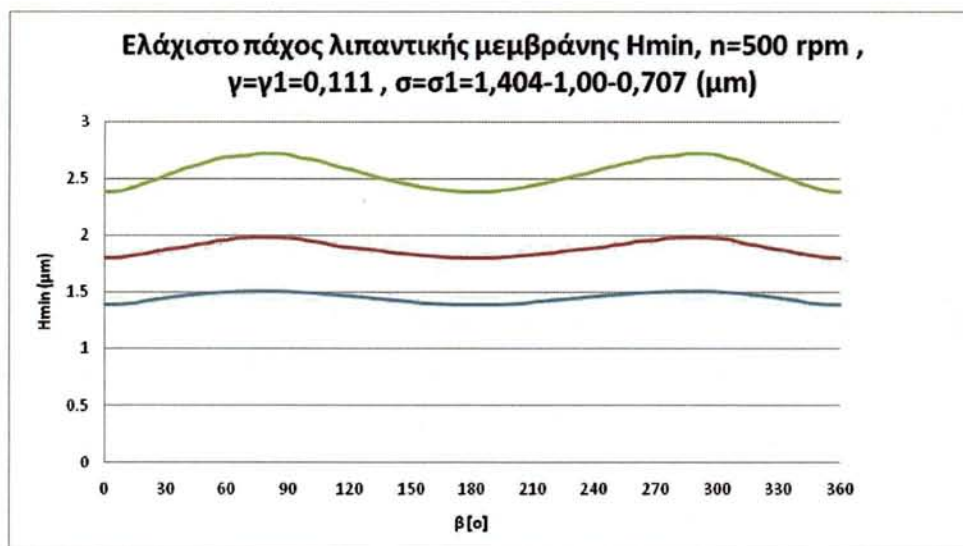
Πλέον, όπως θα φανεί και παρακάτω, λαμβάνονται υπόψη πιο ρεαλιστικά δεδομένα για τις δύο επιφάνειες επαφής (χιτωνίου-δακτυλίου). Εξετάζονται περιπτώσεις με τραχείες και τις δύο επιφάνειες, για πρώτη φορά στα πλαίσια αυτού του κώδικα. Επίσης εξετάζονται και αποτελέσματα όπου η ανισοτροπία στις δύο επιφάνειες είναι διαφορετικής κατεύθυνσης, το οποίο αποτελεί επίσης κάτι ρηξικέλευθο για τις θεωρητικές προσομοιώσεις που έχουν γίνει ως τώρα στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του πανεπιστημίου Θεσσαλίας με την χρήση του συγκεκριμένου κώδικα.



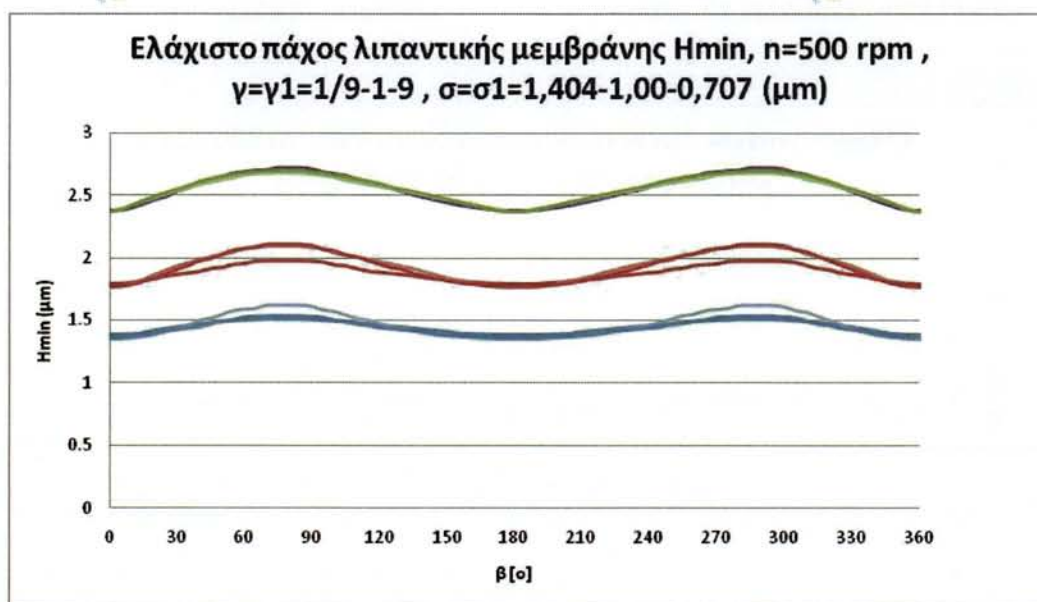
Σχήμα 3.2.1: Διάγραμμα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης συναρτήση της γωνίας στροφαλοφόρου $\gamma=\gamma_1=9$, $\sigma_2=0$, $n=500$ rpm για τρεις καταστάσεις φθοράς τραχείας επιφάνειας πρώτου δακτυλίου. Καμπύλες : χρώματος πράσινου : $\sigma=\sigma_1=1,414$ μm , χρώματος κόκκινο: $\sigma=\sigma_1=1,00$ μm , χρώματος γαλάζιο $\sigma=\sigma_1=0,707$ μm



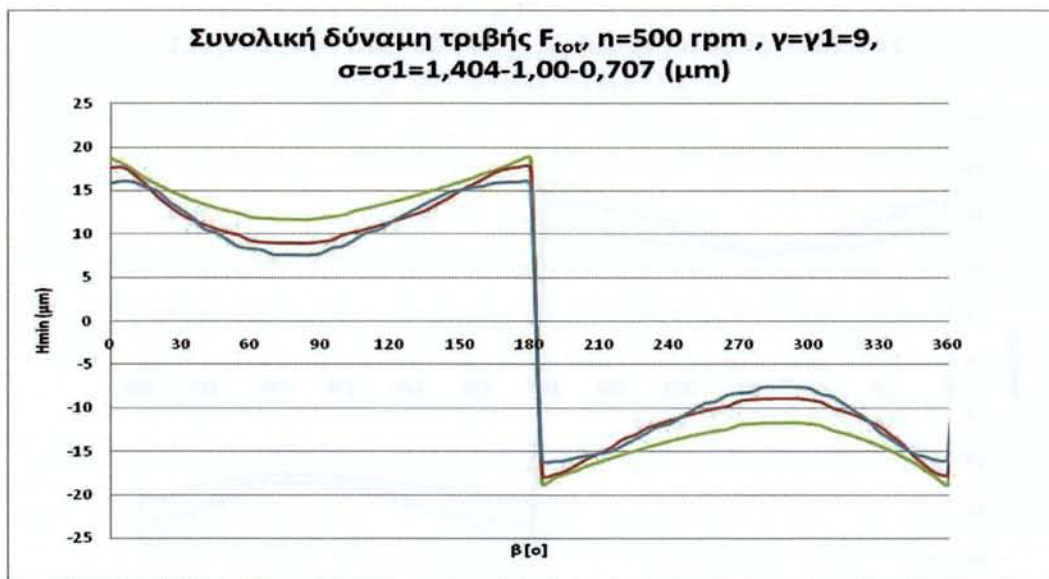
Σχήμα 3.2.2: Διάγραμμα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης συναρτήση της γωνίας στροφαλοφόρου $\gamma=\gamma_1=1$, $\sigma_2=0$, $n=500$ rpm για τρεις καταστάσεις φθοράς τραχείας επιφάνειας πρώτου δακτυλίου. Καμπύλες : χρώματος πράσινου : $\sigma=\sigma_1=1,414$ μm , χρώματος κόκκινο: $\sigma=\sigma_1=1,00$ μm , χρώματος γαλάζιο $\sigma=\sigma_1=0,707$ μm



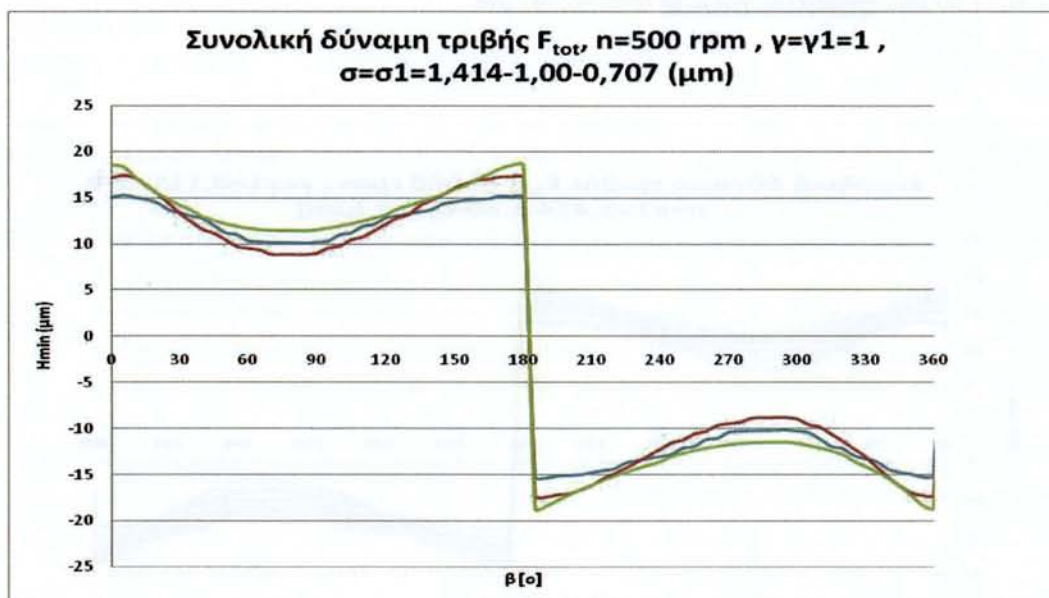
Σχήμα 3.2.3: Διάγραμμα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης συναρτήση της γωνίας στροφαλοφόρου $\gamma=\gamma_1=1/9$, $\sigma_2=0$, $n=500$ rpm για τρεις καταστάσεις φθοράς τραχείας επιφάνειας πρώτου δακτυλίου .Καμπύλες : χρώματος πράσινου : $\sigma=\sigma_1=1,414$ μm , χρώματος κόκκινο: $\sigma=\sigma_1=1,00$ μm , χρώματος γαλάζιο : $\sigma=\sigma_1=0,707$ μm



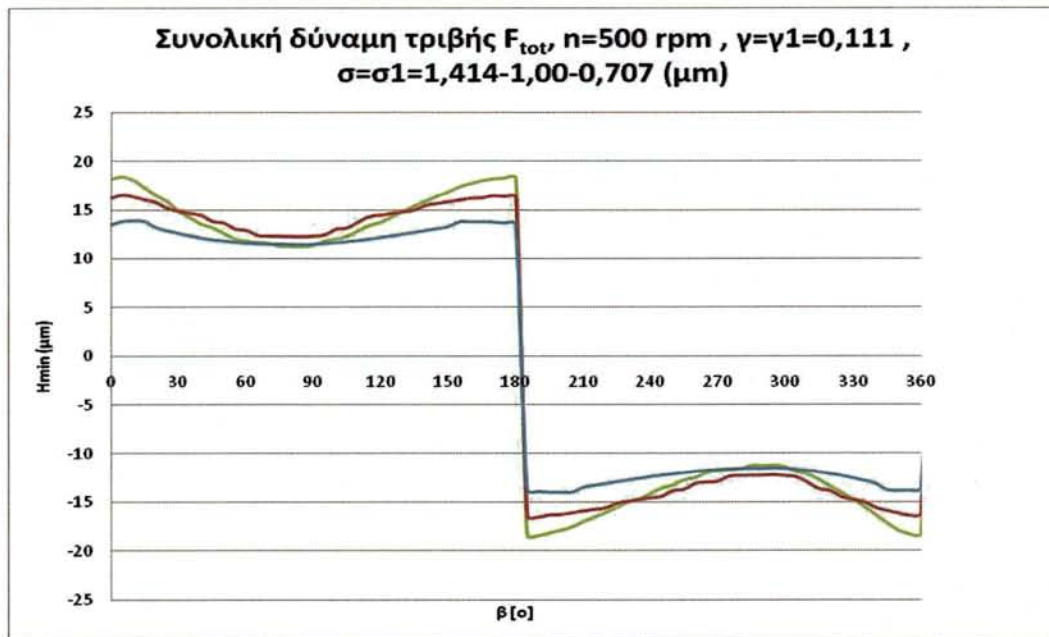
Σχήμα 3.2.4: Συγκεντρωτικό διάγραμμα ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης συναρτήση της γωνίας στροφαλοφόρου σχετιζόμενο με τα διαγράμματα των σχημάτων 1-3 .



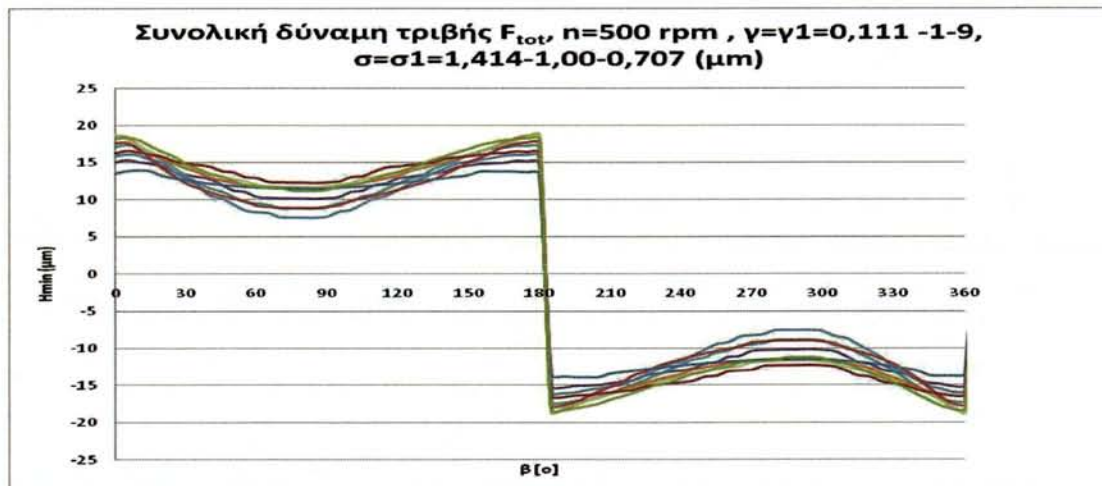
Σχήμα 3.2.5: Διάγραμμα συνολικής δύναμης τριβής συναρτήση της γωνίας στροφαλοφόρου, $\gamma=\gamma_1=9$, $\sigma_2=0$, $n=500$ rpm, για τρεις καταστάσεις φθοράς τραχείας επιφάνειας πρώτου δακτυλίου. Καμπύλες : χρώματος πράσινου : $\sigma=\sigma_1=1,414$ μm , χρώματος κόκκινου : $\sigma=\sigma_1=1,00$ μm , χρώματος γαλάζιου $\sigma=\sigma_1=0,707$ μm



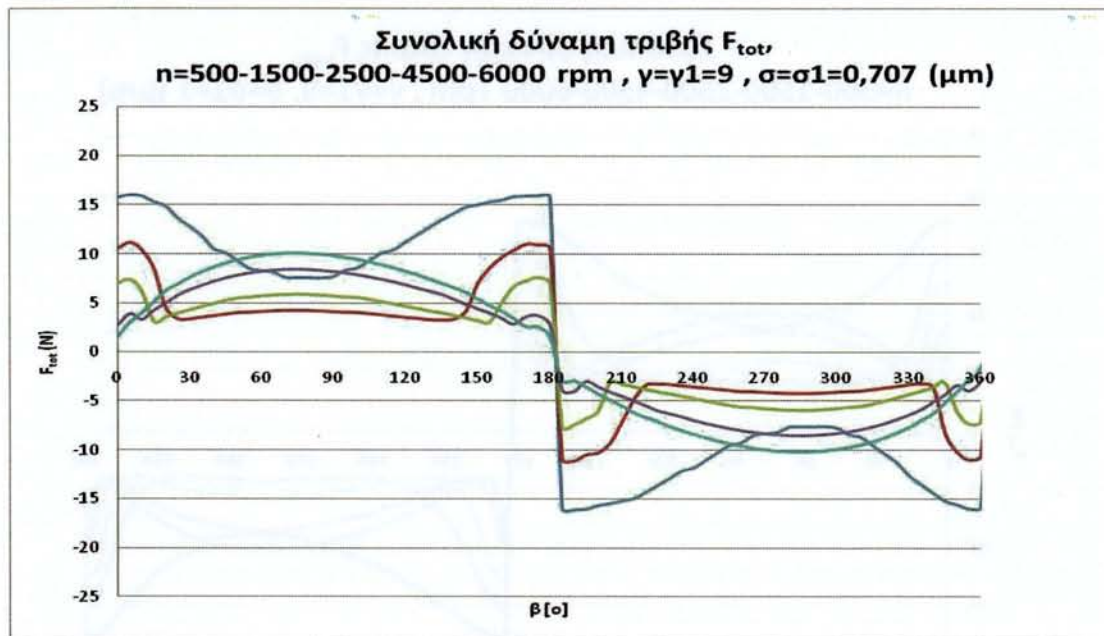
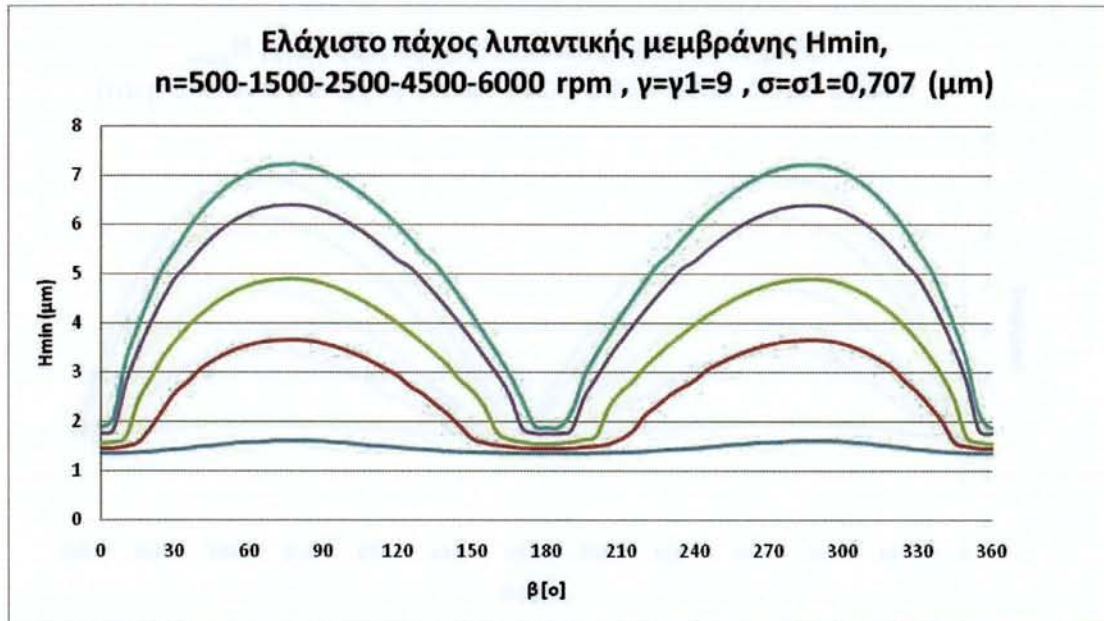
Σχήμα 3.2.6: Διάγραμμα συνολικής δύναμης τριβής συναρτήση της γωνίας στροφαλοφόρου, $\gamma=\gamma_1=1$, $\sigma_2=0$, $n=500$ rpm, για τρεις καταστάσεις φθοράς τραχείας επιφάνειας πρώτου δακτυλίου. Καμπύλες : χρώματος πράσινου : $\sigma=\sigma_1=1,414$ μm , χρώματος κόκκινου : $\sigma=\sigma_1=1,00$ μm , χρώματος γαλάζιου $\sigma=\sigma_1=0,707$ μm



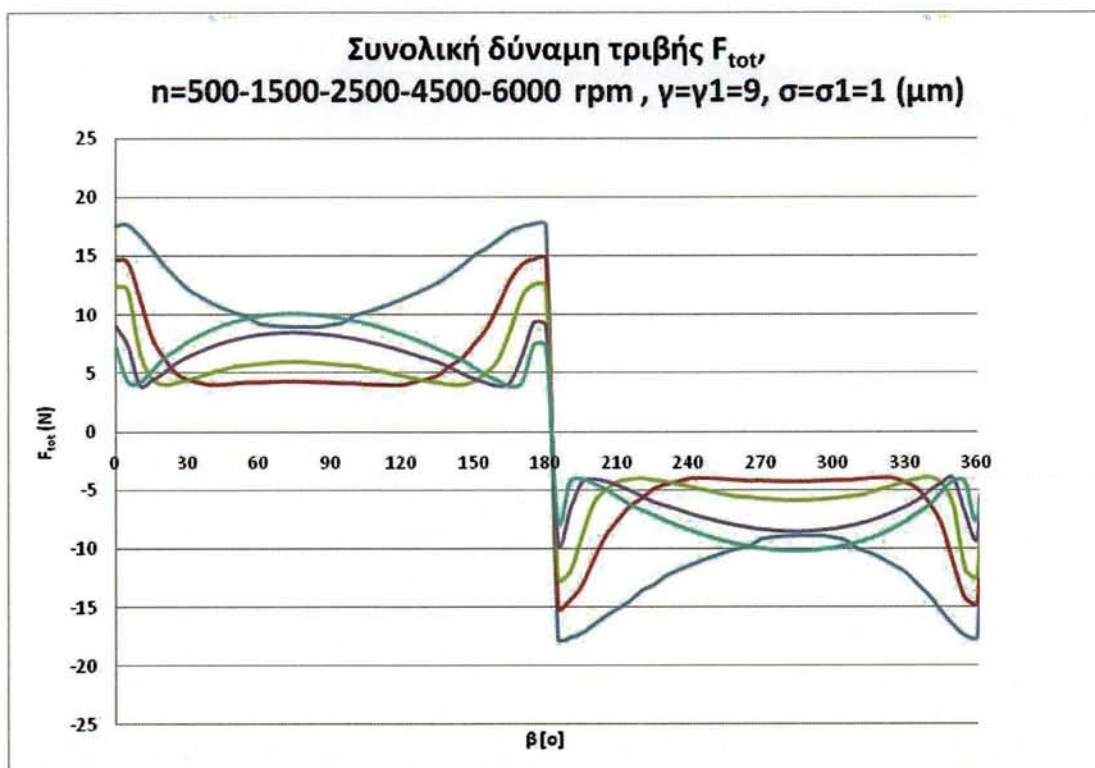
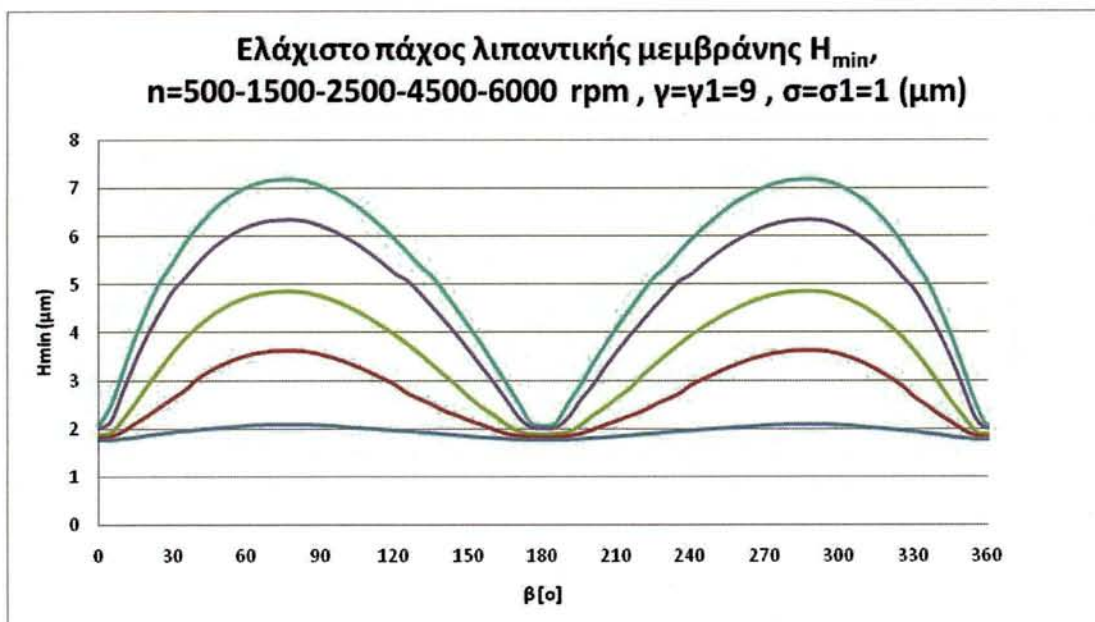
Σχήμα 3.2.7: Διάγραμμα συνολικής δύναμης τριβής συναρτήση της γωνίας στροφαλοφόρου, $\gamma=\gamma_1=1/9$, $\sigma_2=0$, $n=500$ rpm, για τρεις καταστάσεις φθοράς τραχείας επιφάνειας πρώτου δακτυλίου. Καμπύλες : χρώματος πράσινου : $\sigma=\sigma_1=1,414$ μm , χρώματος κόκκινου: $\sigma=\sigma_1=1,00$ μm , χρώματος γαλάζιου $\sigma=\sigma_1=0,707$ μm



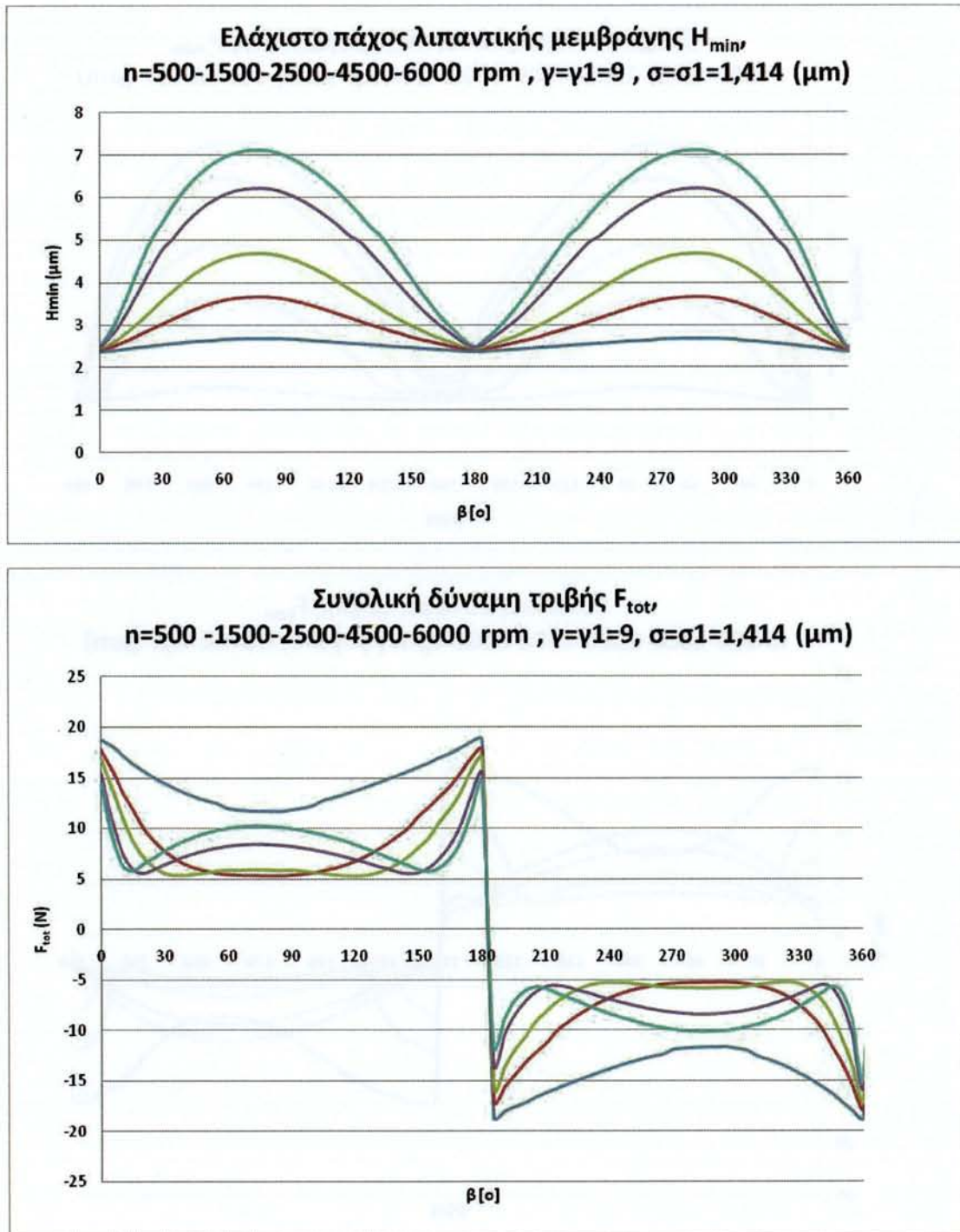
Σχήμα 3.2.8: Συγκεντρωτικό διάγραμμα συνολικής δύναμης τριβής συναρτήση της γωνίας στροφαλοφόρου σχετιζόμενο με τα διαγράμματα των σχημάτων 5-7.



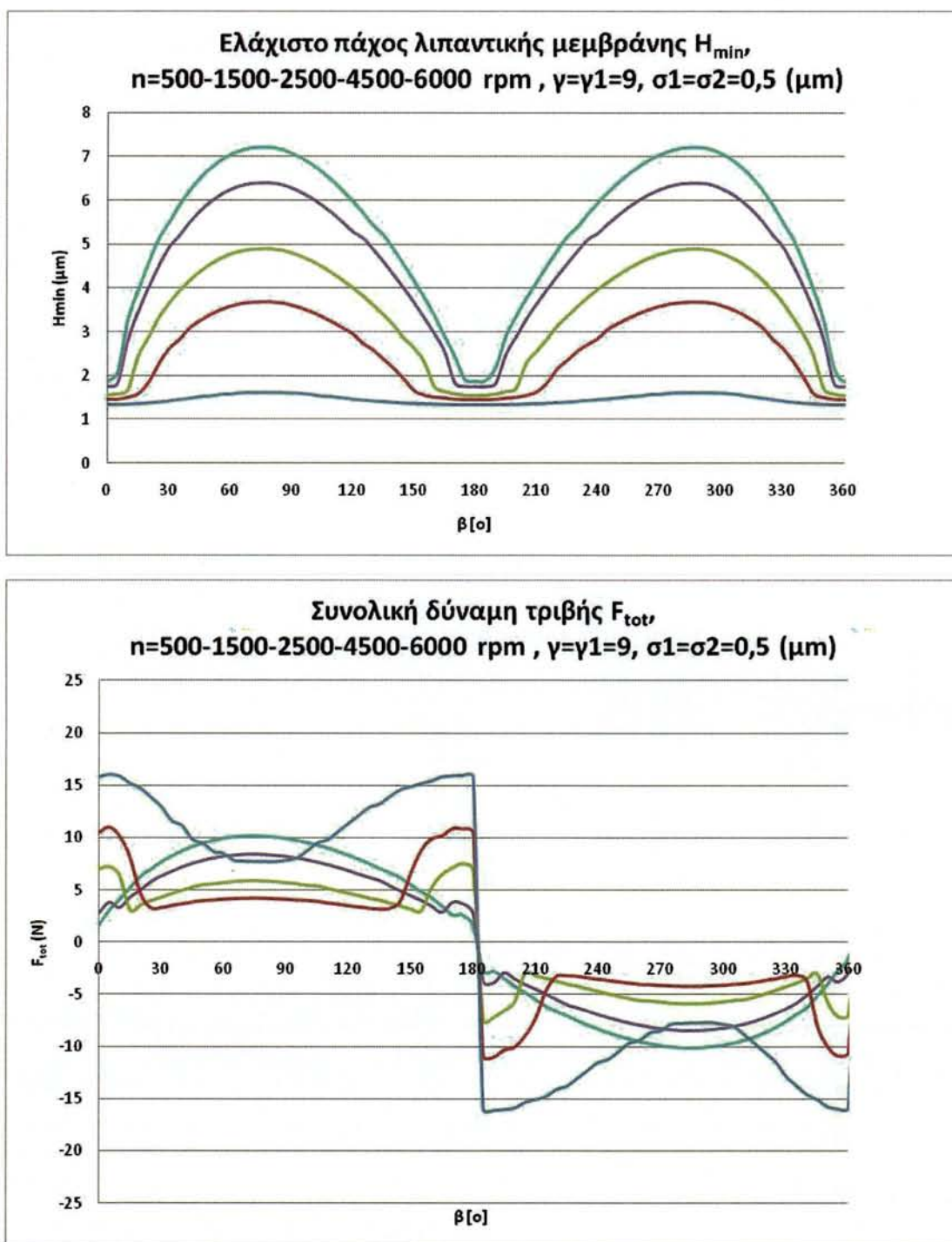
Σχήμα 3.2.9: Διάγραμματα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήση της γωνίας στροφαλοφόρου $\gamma=\gamma_1=1$, $\sigma_2=0$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για φθαρμένη τραχεία επιφάνεια πρώτου δακτυλίου. Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm , χρώματος κόκκινου: $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου: $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ: $n=4500$ rpm , χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm.



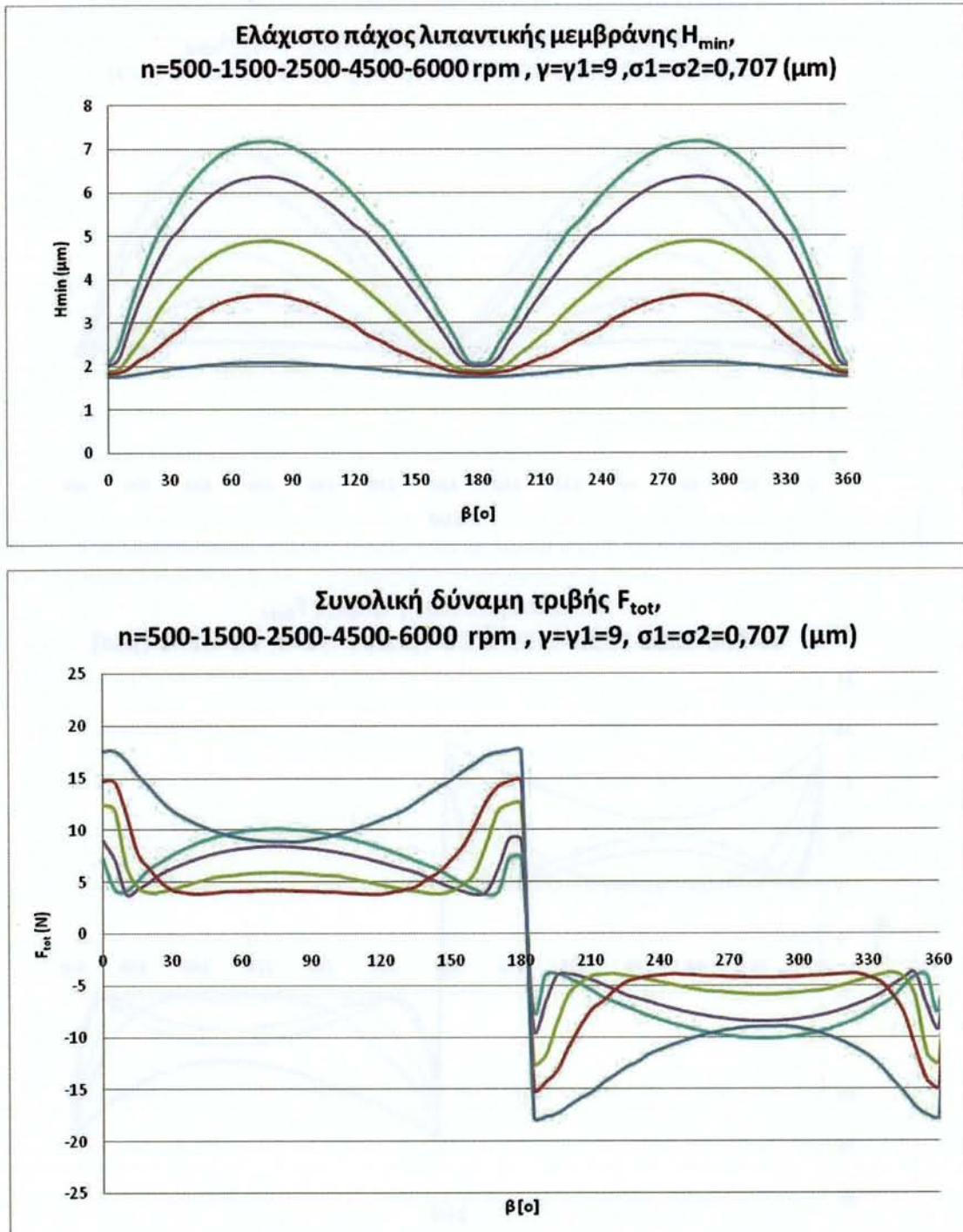
Σχήμα 3.2.10: Διάγραμμα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήσεως της γωνίας στροφαλοφόρου $\gamma=\gamma_1=9$, $\sigma_2=0$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για ελαφρώς φθαρμένη τραχεία επιφάνεια πρώτου δακτυλίου. Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm , χρώματος κόκκινου: $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου: $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ: $n=4500$ rpm , χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm.



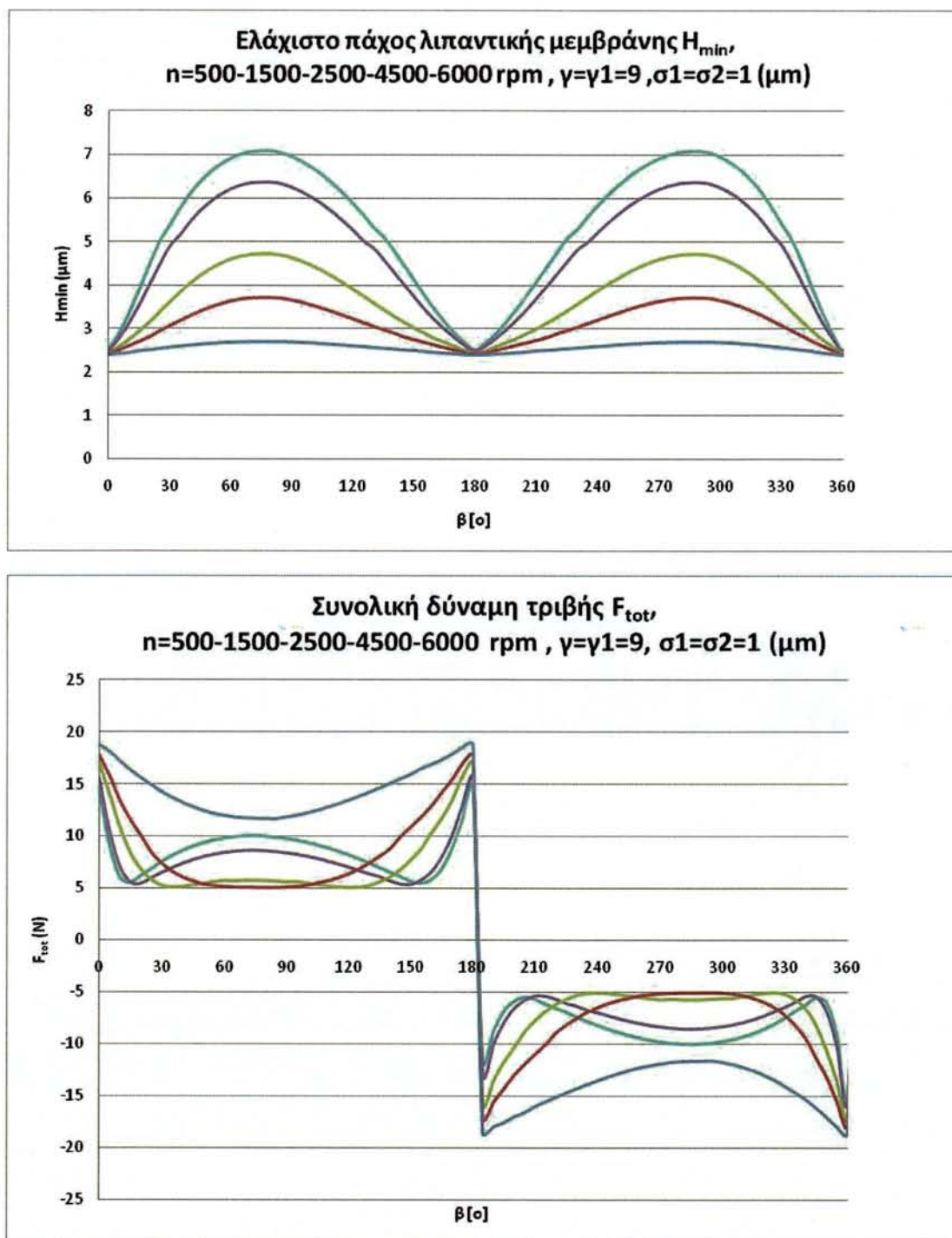
Σχήμα 3.2.11: Διάγραμματα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήση της γωνίας στροφαλοφόρου $\gamma=\gamma_1=9$, $\sigma_2=0$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για μη φθαρμένη τραχεία επιφάνεια πρώτου δακτυλίου. Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm , χρώματος κόκκινου: $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου: $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ: $n=4500$ rpm , χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm.



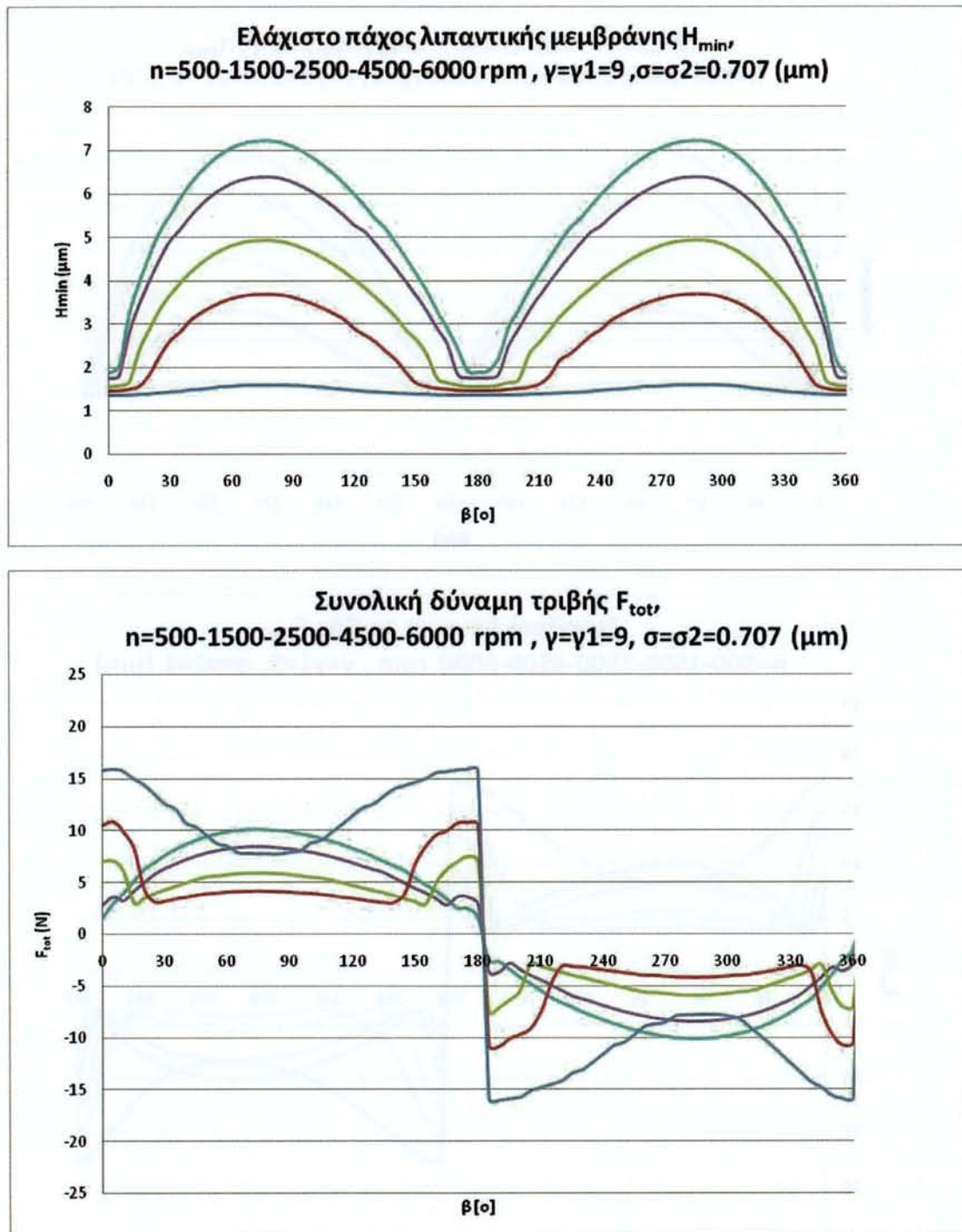
Σχήμα 3.2.12: Διάγραμματα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήση της γωνίας στροφαλοφόρου $\gamma=\gamma_1=\gamma_2=9$, $\sigma_1=\sigma_2$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για φθαρμένη τραχεία επιφάνεια, στο σταθερό καθώς και στο κινούμενο κομμάτι των επιφανειών που έρχονται σε επαφή, στον πρώτο δακτύλιο. Καμπύλες: χρώματος ανοικτού μπλέ: $n=500$ rpm, χρώματος κόκκινου: $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου: $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ: $n=4500$ rpm, χρώματος γαλάζιου: $n=6000$ rpm



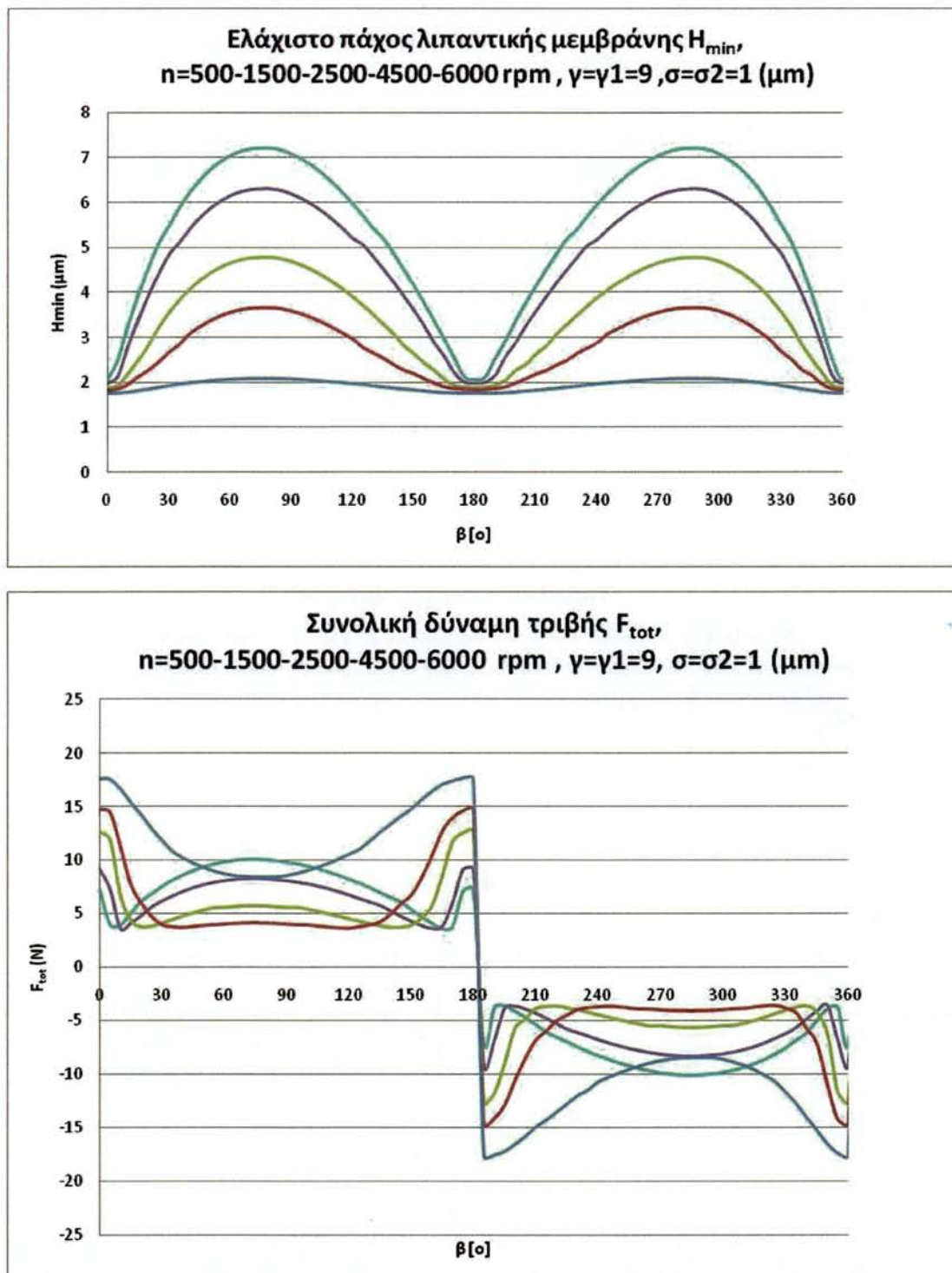
Σχήμα 3.2.13: Διάγραμμα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου $\gamma=\gamma_1=\gamma_2=9$, $\sigma_1=\sigma_2$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για ελαφρώς φθαρμένη τραχεία επιφάνεια, στο σταθερό καθώς και στο κινούμενο κομμάτι των επιφανειών που έρχονται σε επαφή, στον πρώτο δακτύλιο. Καμπύλες: χρώματος ανοικτού μπλέ: $n=500$ rpm, χρώματος κόκκινου: $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου: $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ: $n=4500$ rpm, χρώματος γαλάζιου: $n=6000$ rpm.



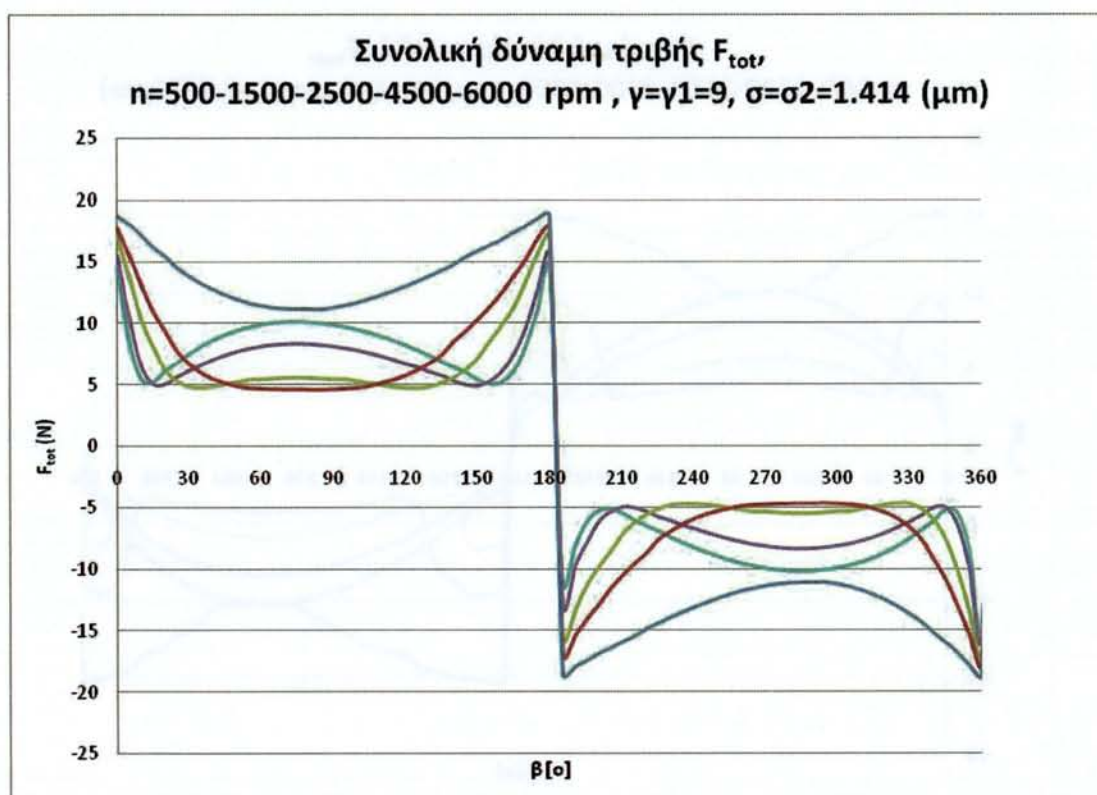
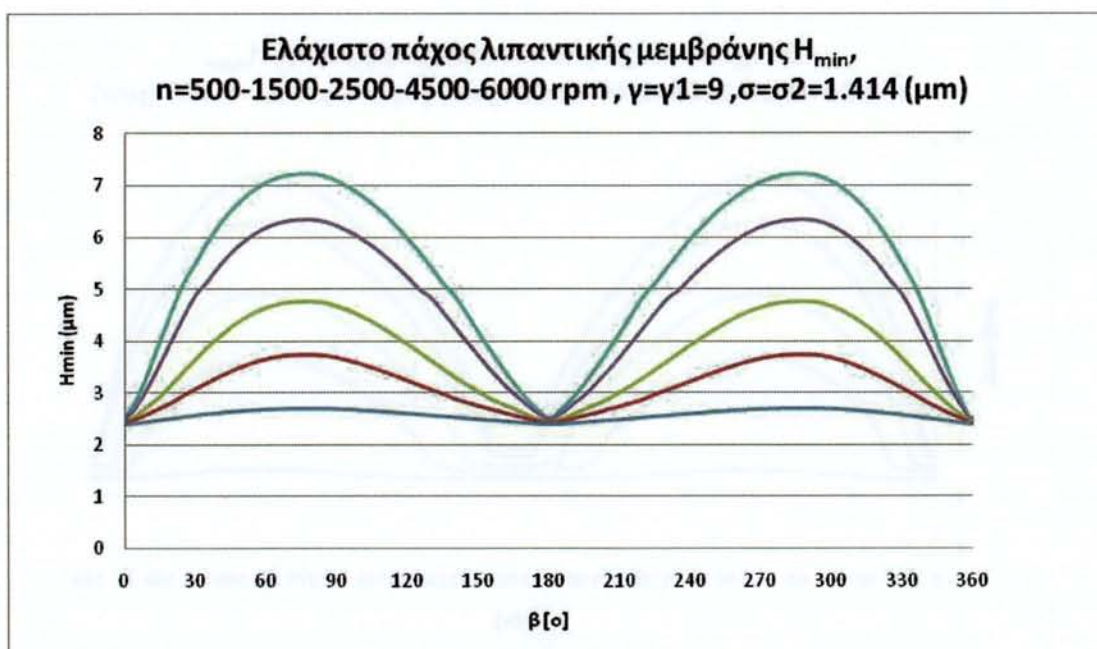
Σχήμα 3.2.14: Διάγραμματα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήση της γωνίας στροφαλοφόρου, $\gamma=\gamma_1=\gamma_2=9$, $\sigma_1=\sigma_2$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για μη φθαρμένη τραχεία επιφάνεια ,στο σταθερό καθώς και στο κινούμενο κομμάτι των επιφανειών που έρχονται σε επαφή , στον πρώτο δακτύλιο .Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm , χρώματος κόκκινου: $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου: $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ: $n=4500$ rpm , χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm.



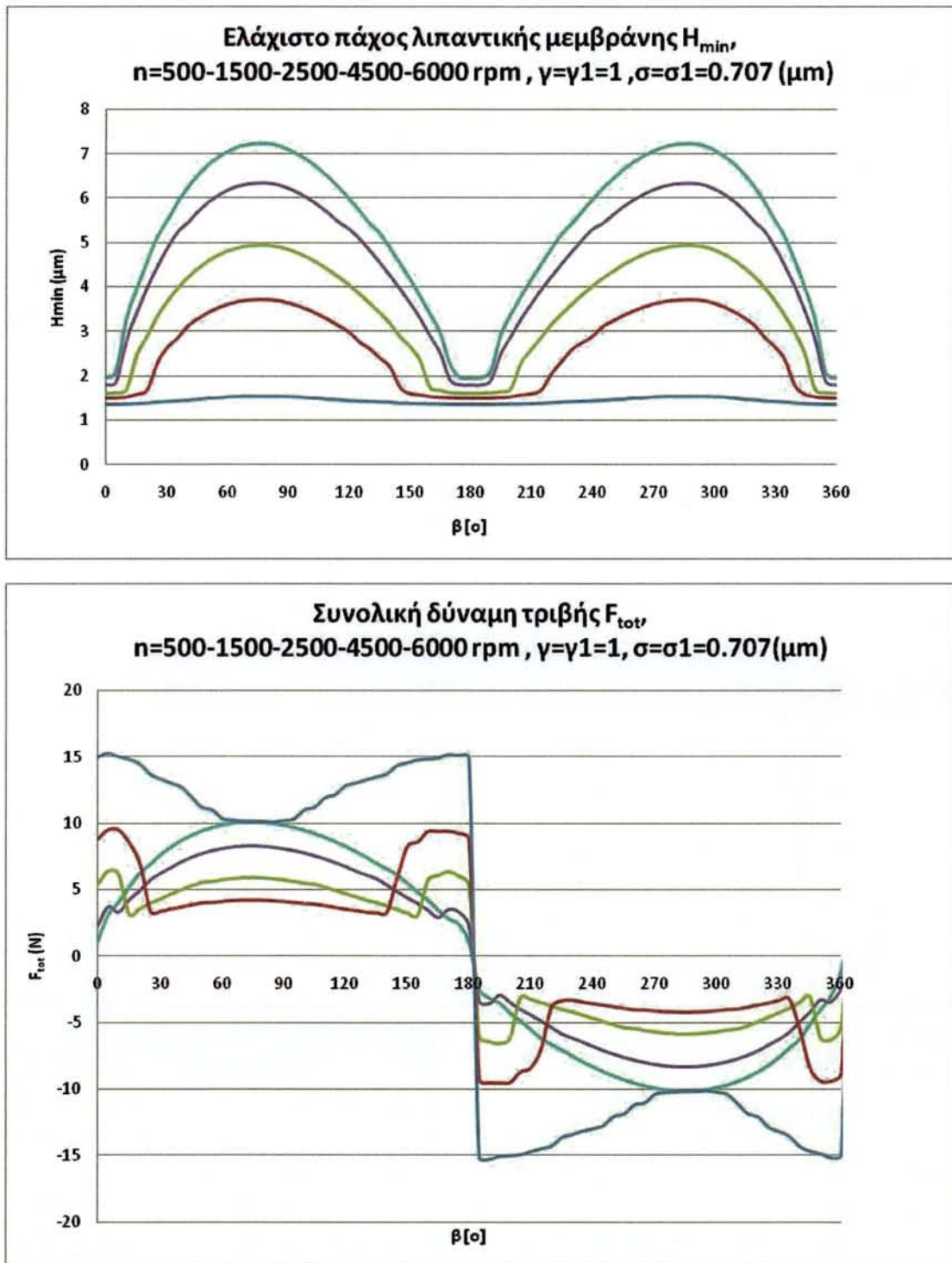
Σχήμα 3.2.15: Διάγραμμα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήση της γωνίας στροφαλοφόρου $\gamma = \gamma_2 = 9$, $\sigma_1 = 0$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για φθαρμένη τραχεία επιφάνεια του πρώτου δακτυλίου. Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm , χρώματος κόκκινου: $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου: $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ: $n=4500$ rpm , χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm.



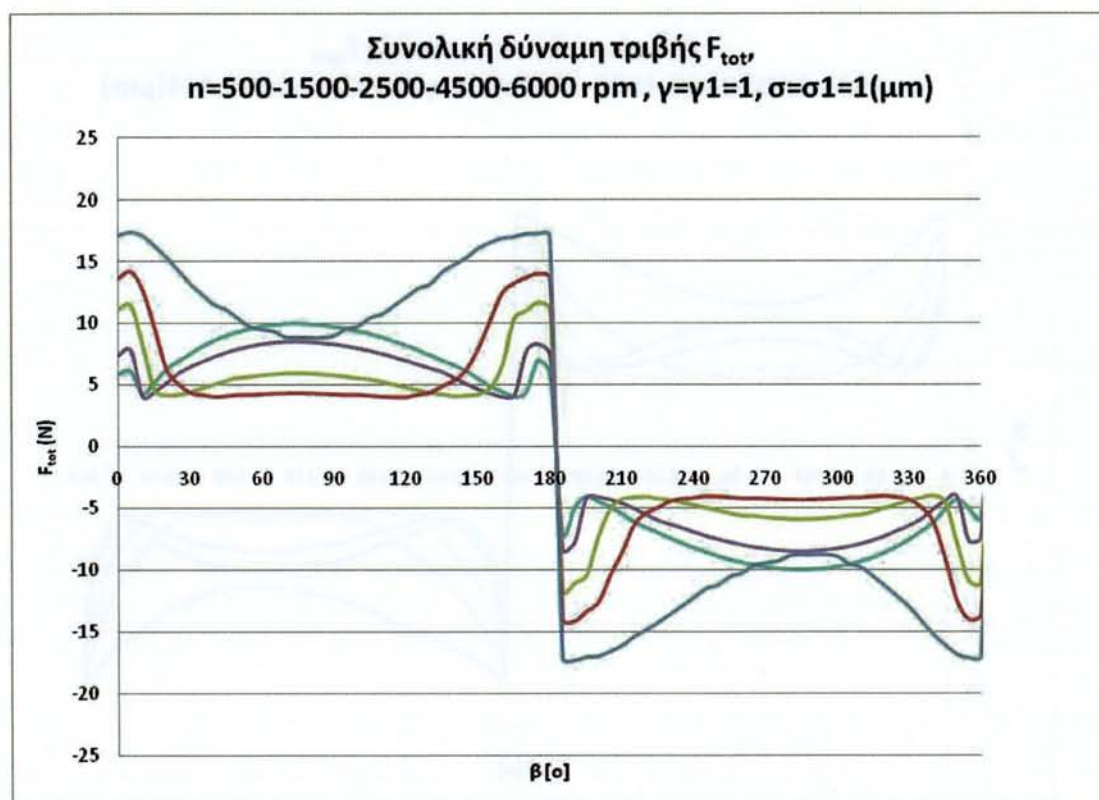
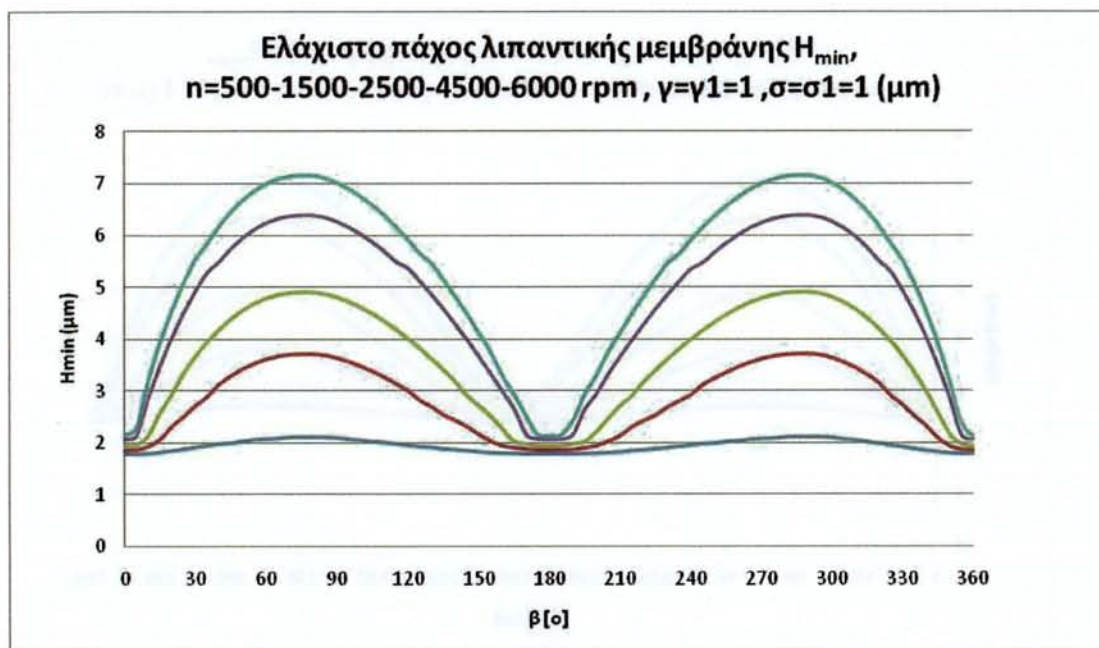
Σχήμα 3.2.16: Διάγραμματα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήση της γωνίας στροφαλοφόρου $\gamma = \gamma_2 = 9$, $\sigma_1 = 0$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για ελαφρώς φθαρμένη τραχεία επιφάνεια του πρώτου δακτυλίου. Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm , χρώματος κόκκινου: $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου: $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ: $n=4500$ rpm , χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm.



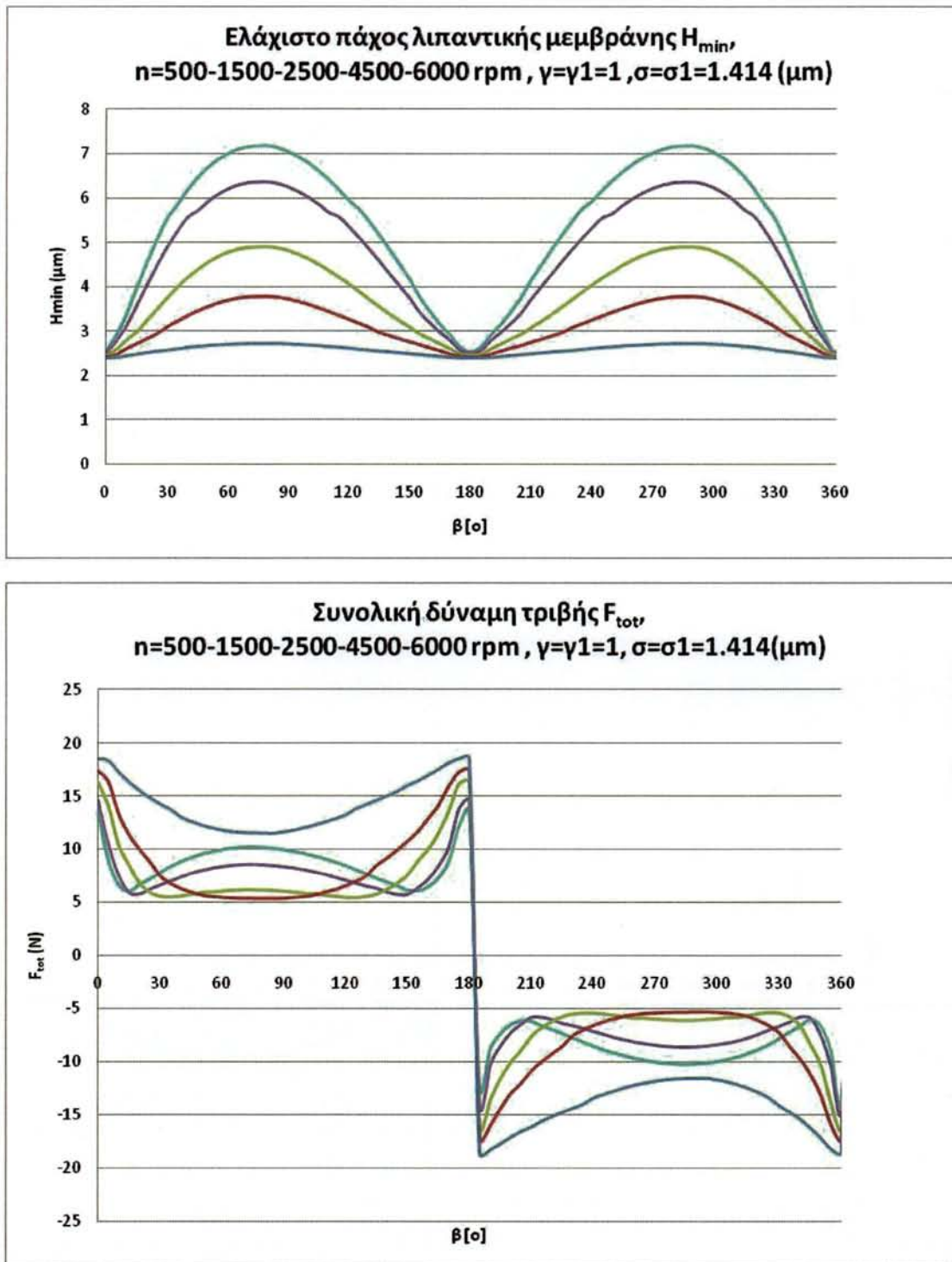
Σχήμα 3.2.17: Διάγραμματα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήση της γωνίας στροφαλοφόρου $\gamma=\gamma_2=9$, $\sigma_1=0$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για μη φθαρμένη τραχεία επιφάνεια του πρώτου δακτυλίου. Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm , χρώματος κόκκινου: $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου: $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ: $n=4500$ rpm , χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm.



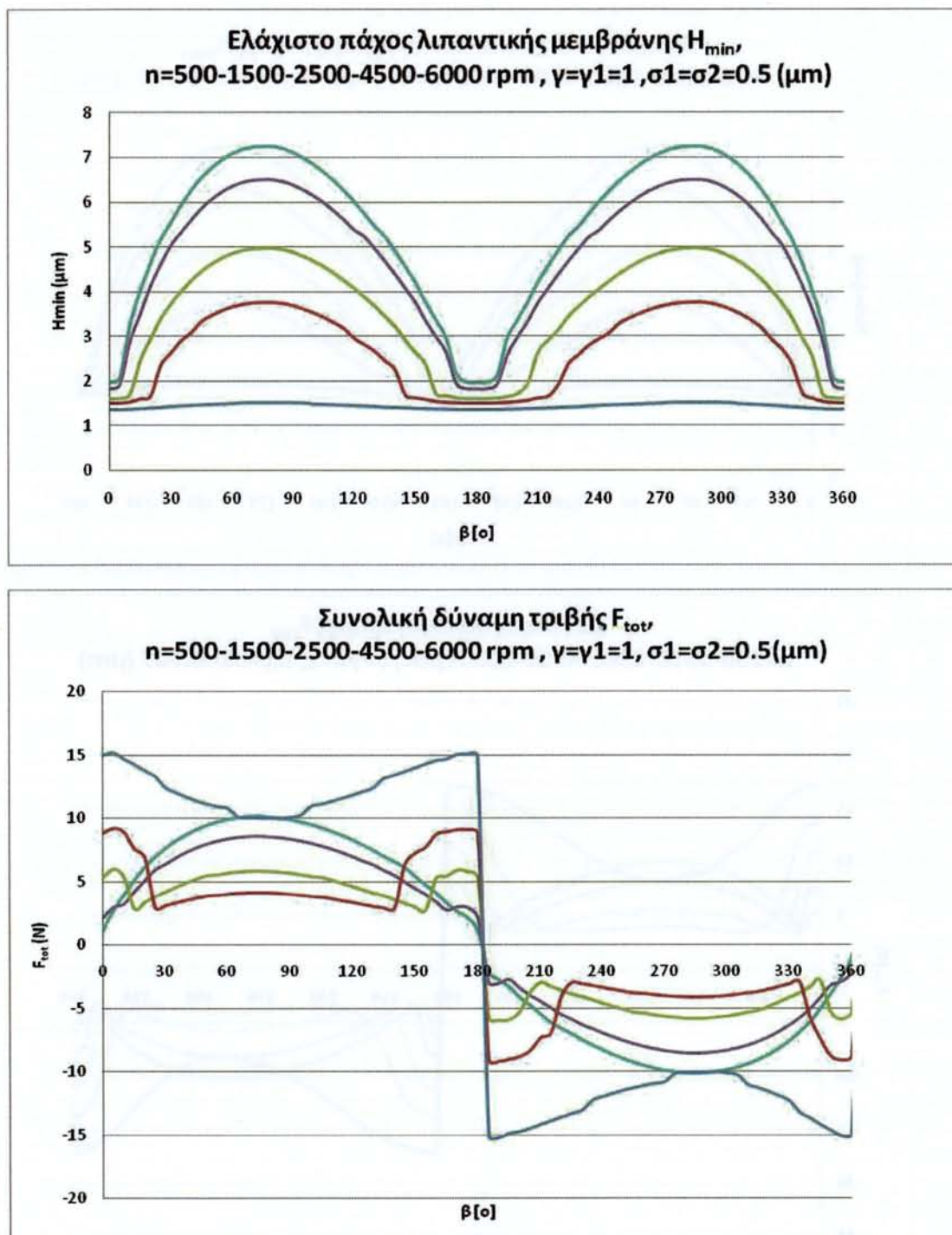
Σχήμα 3.2.18: Διάγραμμα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήση της γωνίας στροφαλοφόρου $\gamma = \gamma_1=1, \sigma_2=0$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για φθαρμένη τραχεία επιφάνεια του πρώτου δακτυλίου. Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm, χρώματος κόκκινου: $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου: $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ: $n=4500$ rpm, χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm.



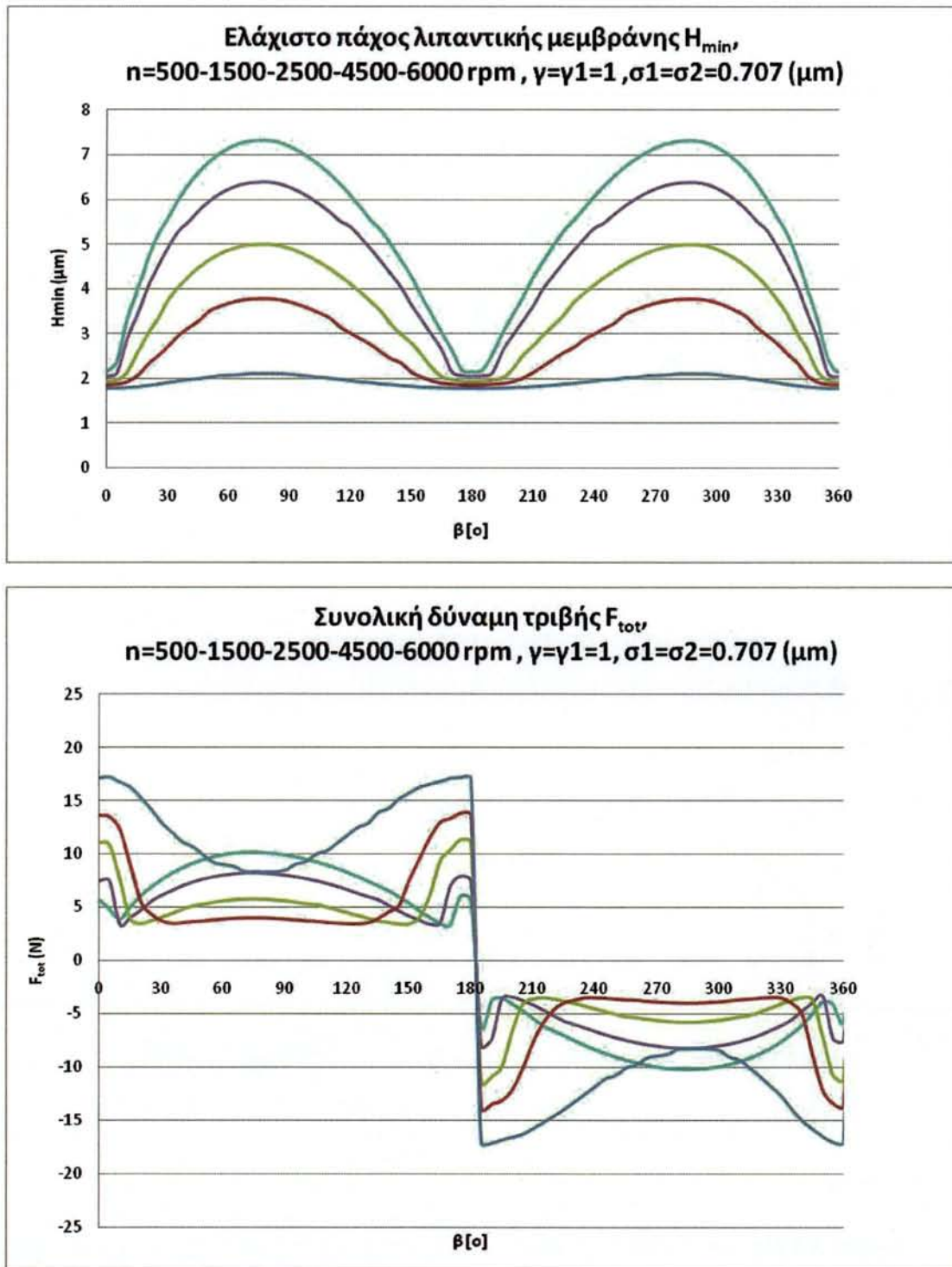
Σχήμα 3.2.19: Διάγραμματα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήση της γωνίας στροφαλοφόρου $\gamma = \gamma_1 = 1$, $\sigma_2 = 0$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για ελαφρώς φθαρμένη τραχεία επιφάνεια του πρώτου δακτυλίου. Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm, χρώματος κόκκινου: $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου: $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ: $n=4500$ rpm, χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm.



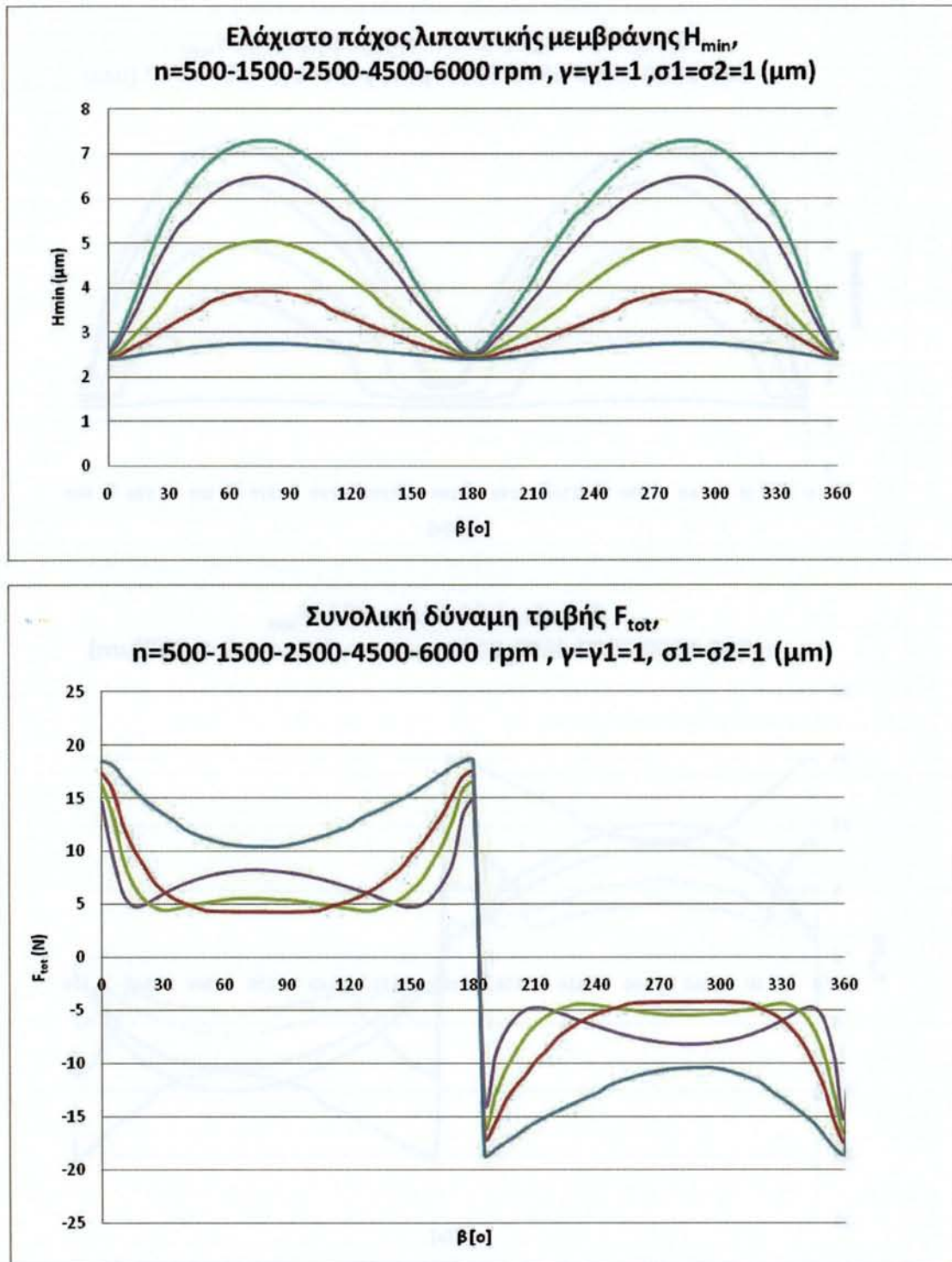
Σχήμα 3.2.20: Διάγραμμα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήση της γωνίας στροφαλοφόρου $\gamma = \gamma_1=1, \sigma_2=0$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για μη φθαρμένη τραχεία επιφάνεια του πρώτου δακτυλίου. Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm , χρώματος κόκκινου: $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου: $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ: $n=4500$ rpm , χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm.



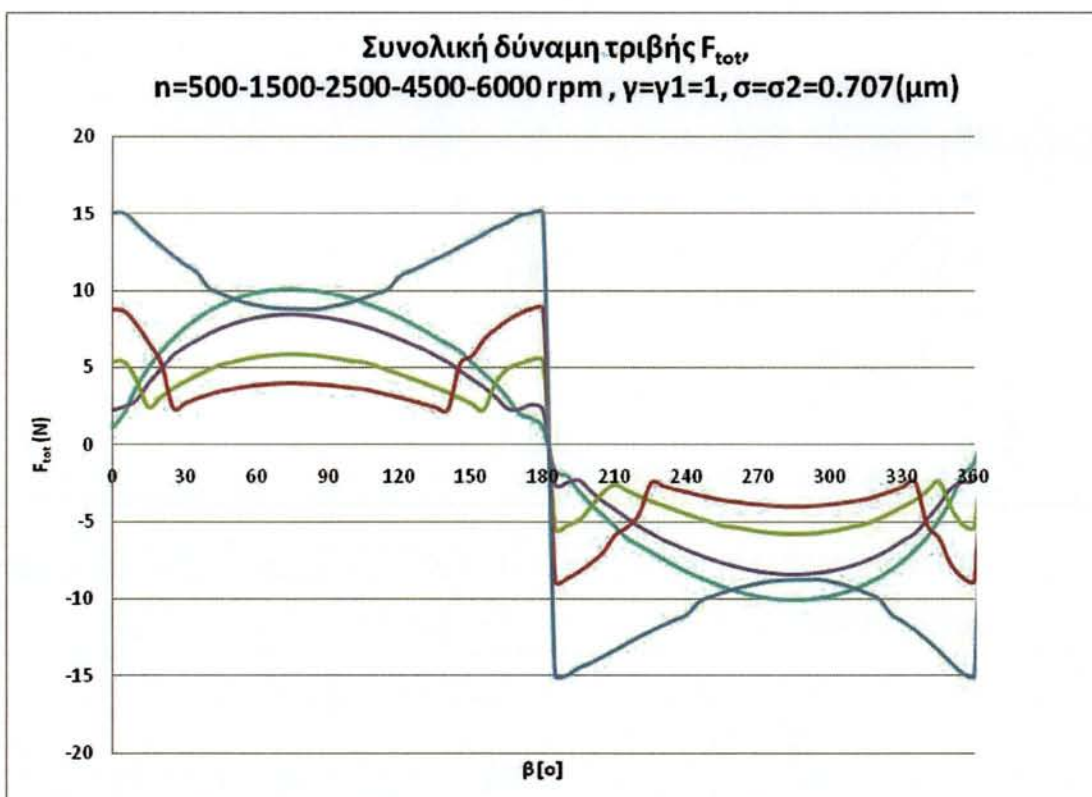
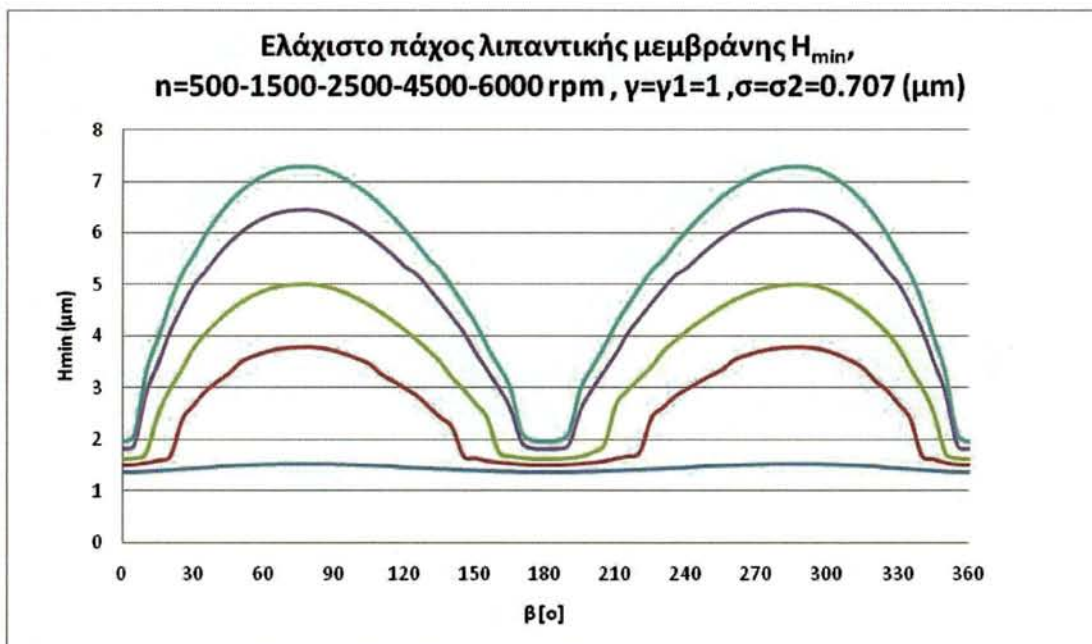
Σχήμα 3.2.21: Διάγραμμα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήση της γωνίας στροφαλοφόρου, $\gamma=\gamma_1=\gamma_2=9$, $\sigma_1=\sigma_2$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για μη φθαρμένη τραχεία επιφάνεια, στο σταθερό καθώς και στο κινούμενο κομμάτι των επιφανειών που έρχονται σε επαφή, στον πρώτο δακτύλιο. Καμπύλες: χρώματος ανοικτού μπλέ: $n=500$ rpm, χρώματος κόκκινου: $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου: $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ: $n=4500$ rpm, χρώματος γαλάζιου: $n=6000$ rpm.



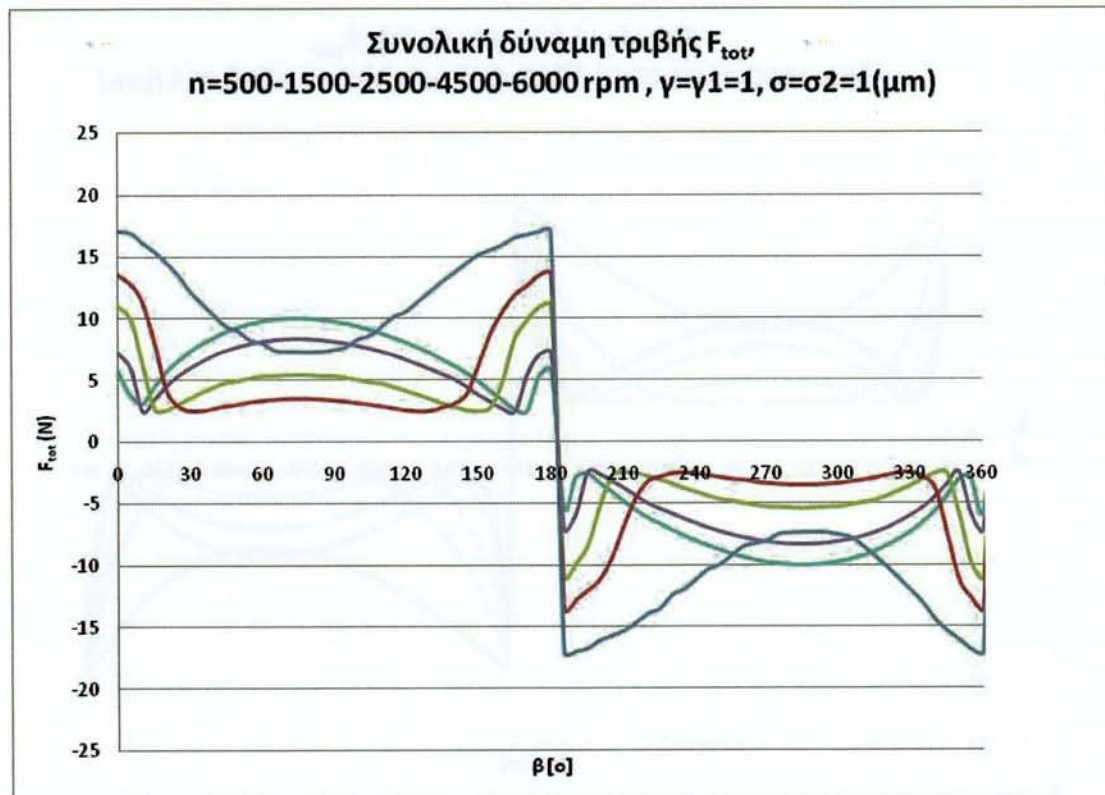
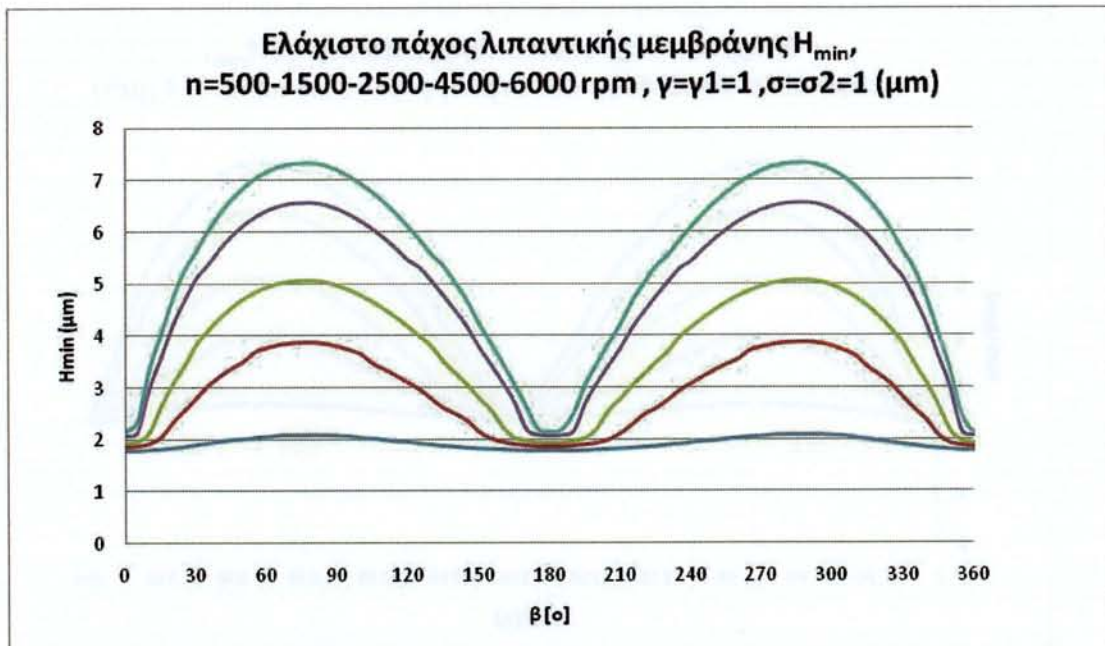
Σχήμα 3.2.22: Διάγραμμα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου, $\gamma=\gamma_1=\gamma_2=9, \sigma_1=\sigma_2$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για μη φθαρμένη τραχεία επιφάνεια, στο σταθερό καθώς και στο κινούμενο κομμάτι των επιφανειών που έρχονται σε επαφή, στον πρώτο δακτύλιο. Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm, χρώματος κόκκινου : $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου : $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ : $n=4500$ rpm, χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm.



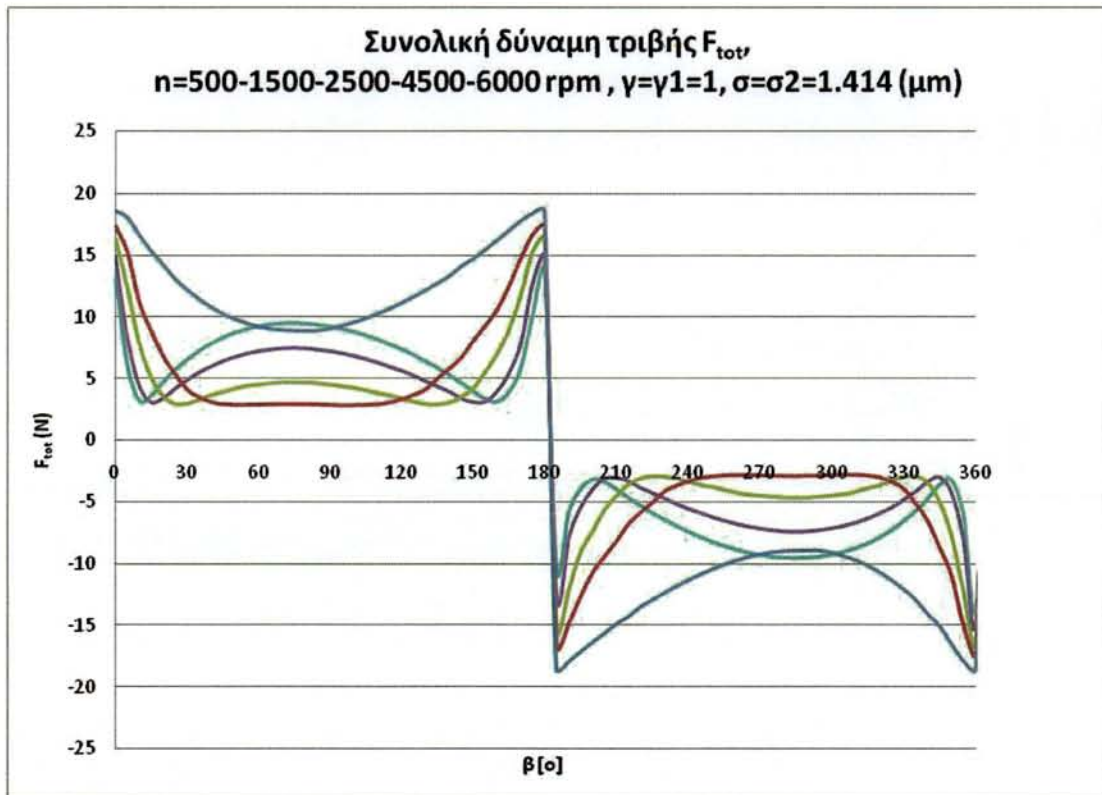
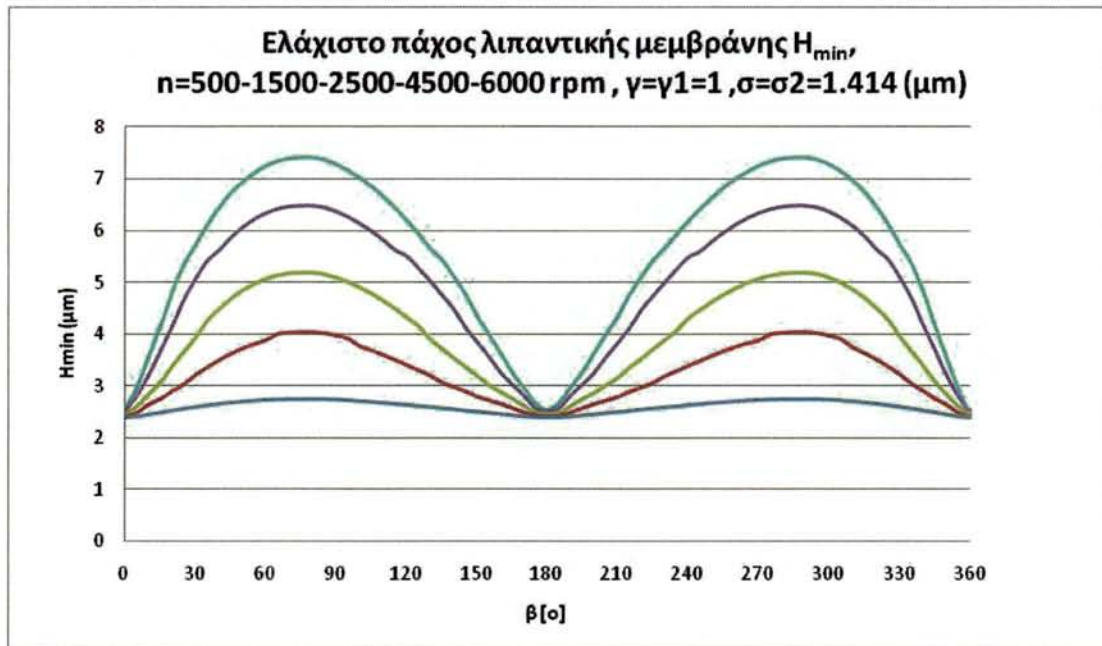
Σχήμα 3.2.23: Διάγραμματα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήση της γωνίας στροφαλοφόρου, $\gamma=\gamma_1=\gamma_2=9, \sigma_1=\sigma_2$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για μη φθαρμένη τραχεία επιφάνεια, στο σταθερό καθώς και στο κινούμενο κομμάτι των επιφανειών που έρχονται σε επαφή, στον πρώτο δακτύλιο. Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm, χρώματος κόκκινου : $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου : $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ : $n=4500$ rpm, χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm.



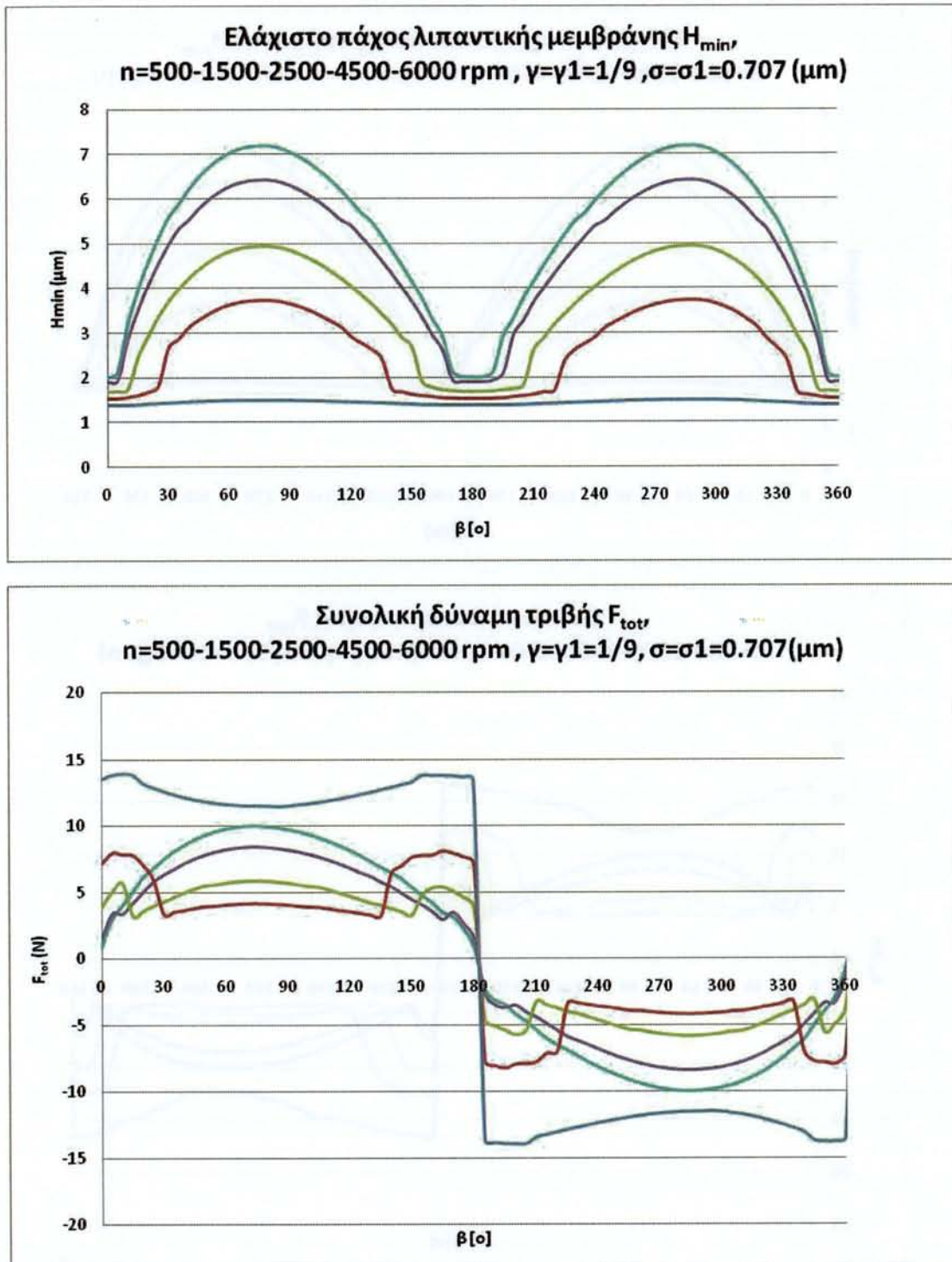
Σχήμα 3.2.24: Διάγραμμα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήση της γωνίας στροφαλοφόρου $\gamma = \gamma_2 = 9$, $\sigma_1 = 0$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για μη φθαρμένη τραχεία επιφάνεια του πρώτου δακτυλίου. Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm , χρώματος κόκκινου: $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου: $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ: $n=4500$ rpm , χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm.



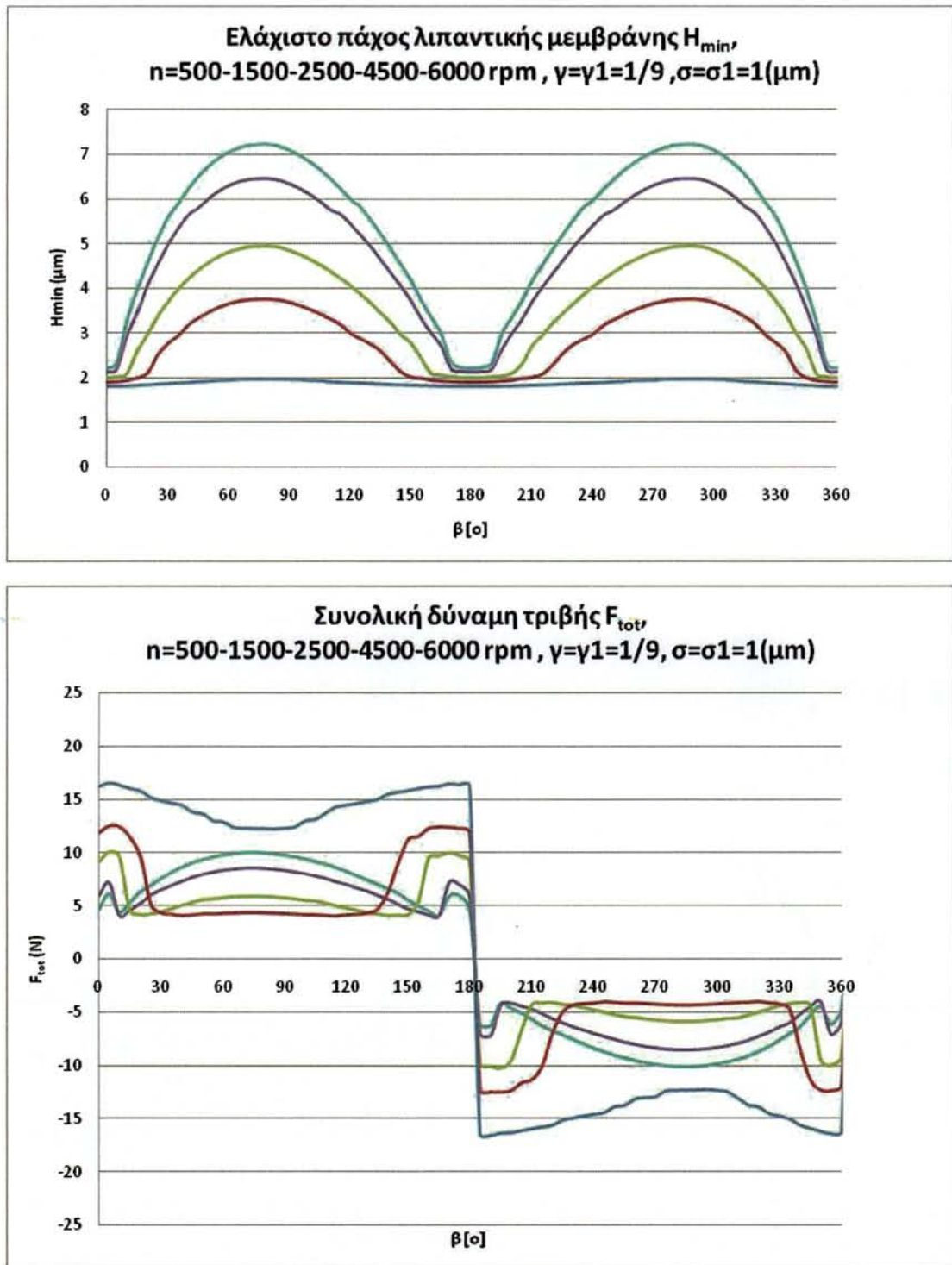
Σχήμα 3.2.25: Διάγραμμα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήση της γωνίας στροφαλοφόρου $\gamma=\gamma_2=9$, $\sigma_1=0$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για μη φθαρμένη τραχεία επιφάνεια του πρώτου δακτυλίου. Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm, χρώματος κόκκινου: $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου: $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ: $n=4500$ rpm, χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm.



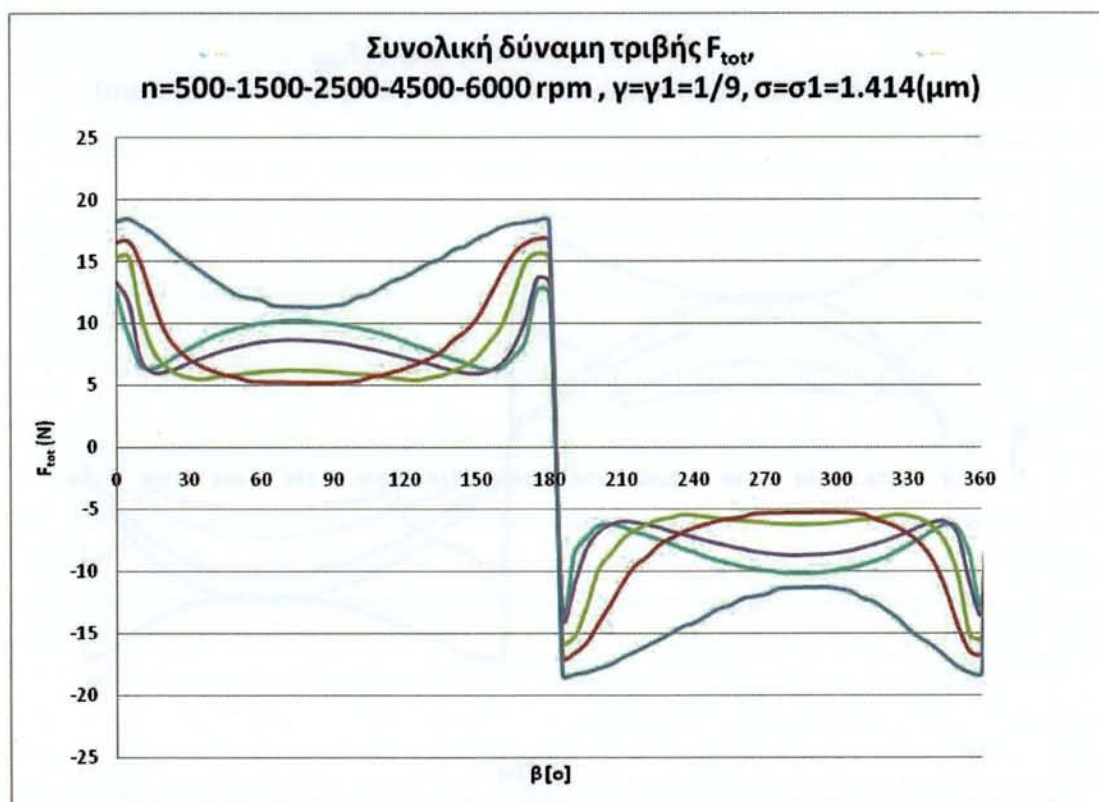
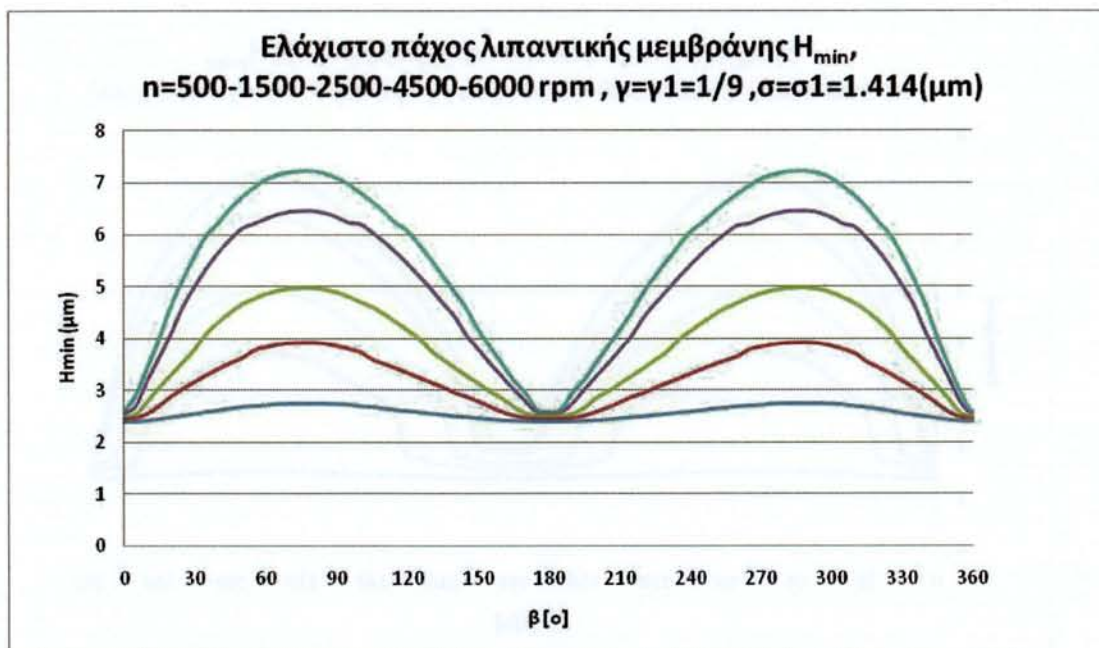
Σχήμα 3.2.26: Διάγραμμα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήσεως της γωνίας στροφαλοφόρου $\gamma = \gamma_2 = 9$, $\sigma_1 = 0$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για μη φθαρμένη τραχεία επιφάνεια του πρώτου δακτυλίου. Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm, χρώματος κόκκινου: $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου: $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ: $n=4500$ rpm, χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm.



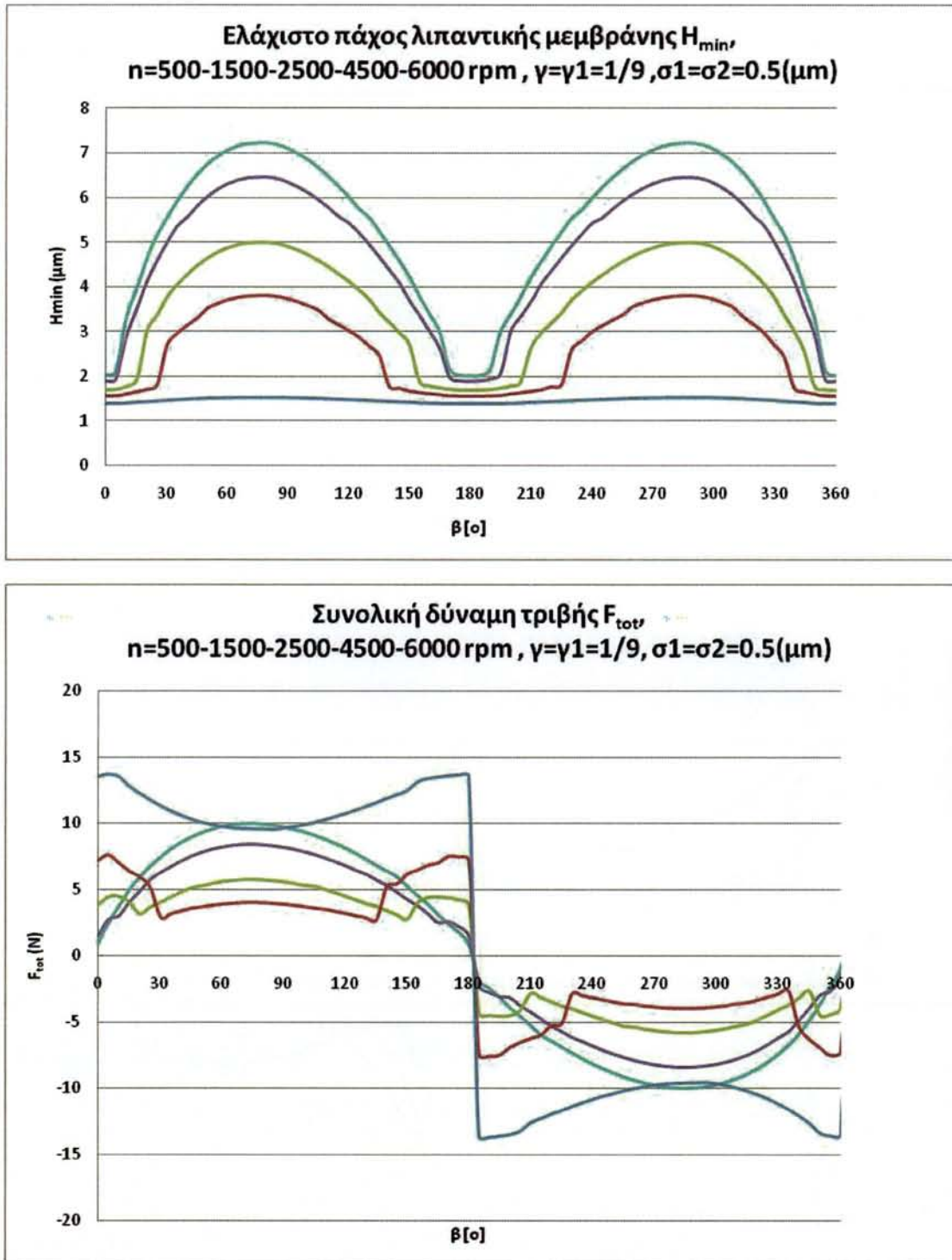
Σχήμα 3.2.27: Διάγραμματα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου $\gamma=\gamma_1=9$, $\sigma_2=0$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για ελαφρώς φθαρμένη τραχεία επιφάνεια πρώτου δακτυλίου. Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm, χρώματος κόκκινου: $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου: $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ: $n=4500$ rpm, χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm



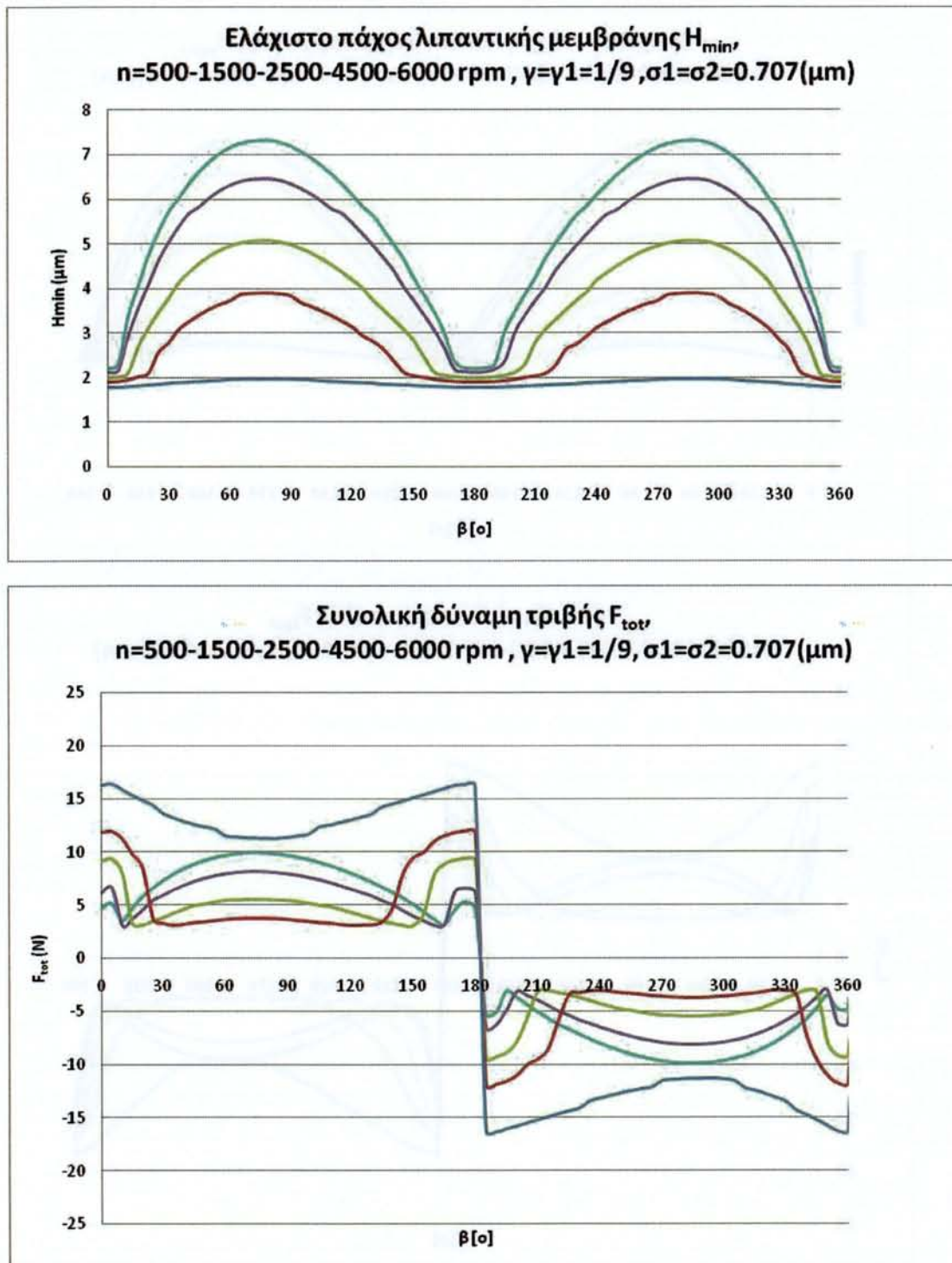
Σχήμα 3.2.28: Διάγραμματα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήση της γωνίας στροφαλοφόρου $\gamma=\gamma_1=9$, $\sigma_2=0$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για ελαφρώς φθαρμένη τραχεία επιφάνεια πρώτου δακτυλίου. Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm , χρώματος κόκκινου: $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου: $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ: $n=4500$ rpm , χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm.



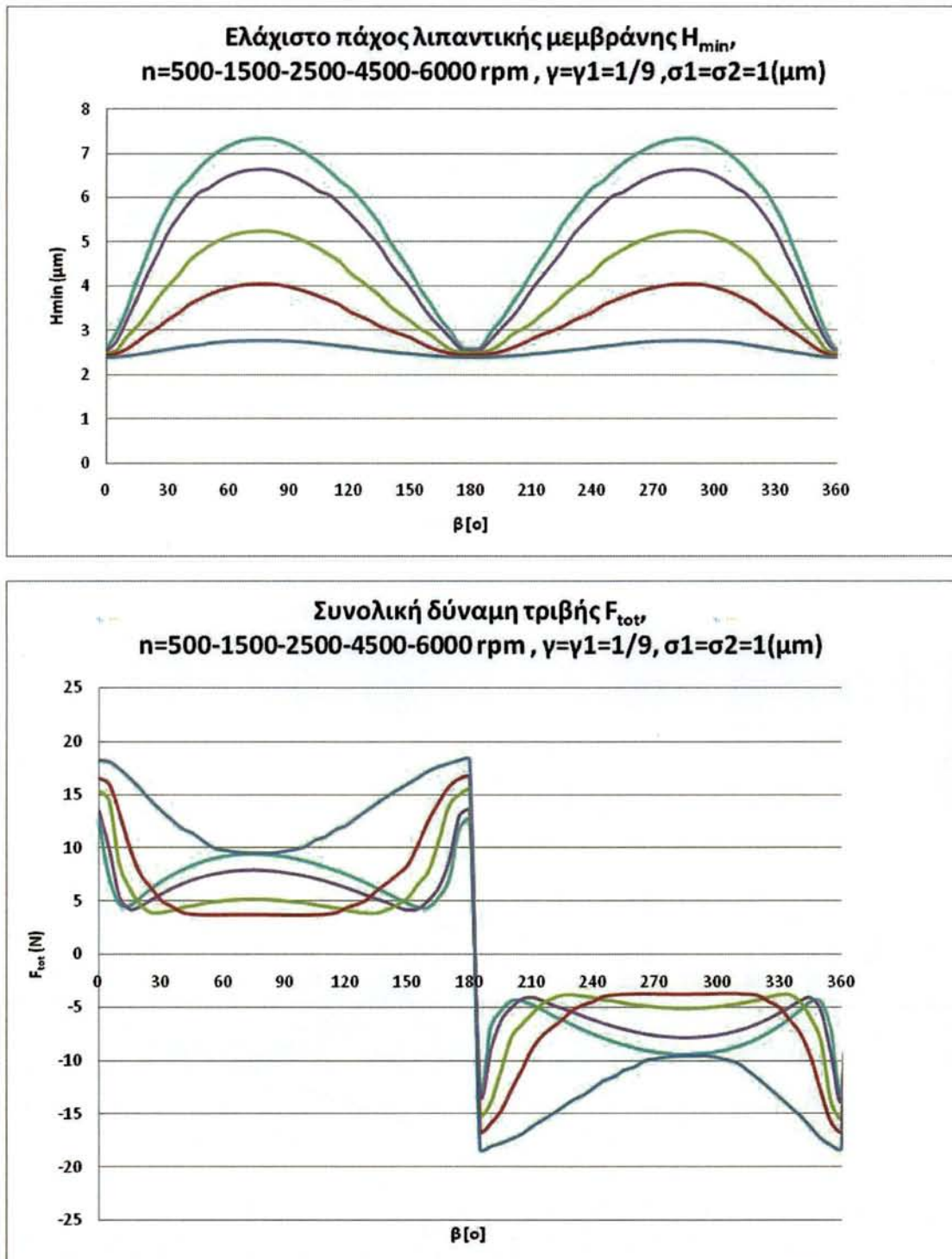
Σχήμα 3.2.29: Διάγραμμα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου $\gamma=\gamma_1=9$, $\sigma_2=0$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για ελαφρώς φθαρμένη τραχεία επιφάνεια πρώτου δακτυλίου. Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm, χρώματος κόκκινου: $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου: $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ: $n=4500$ rpm, χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm.



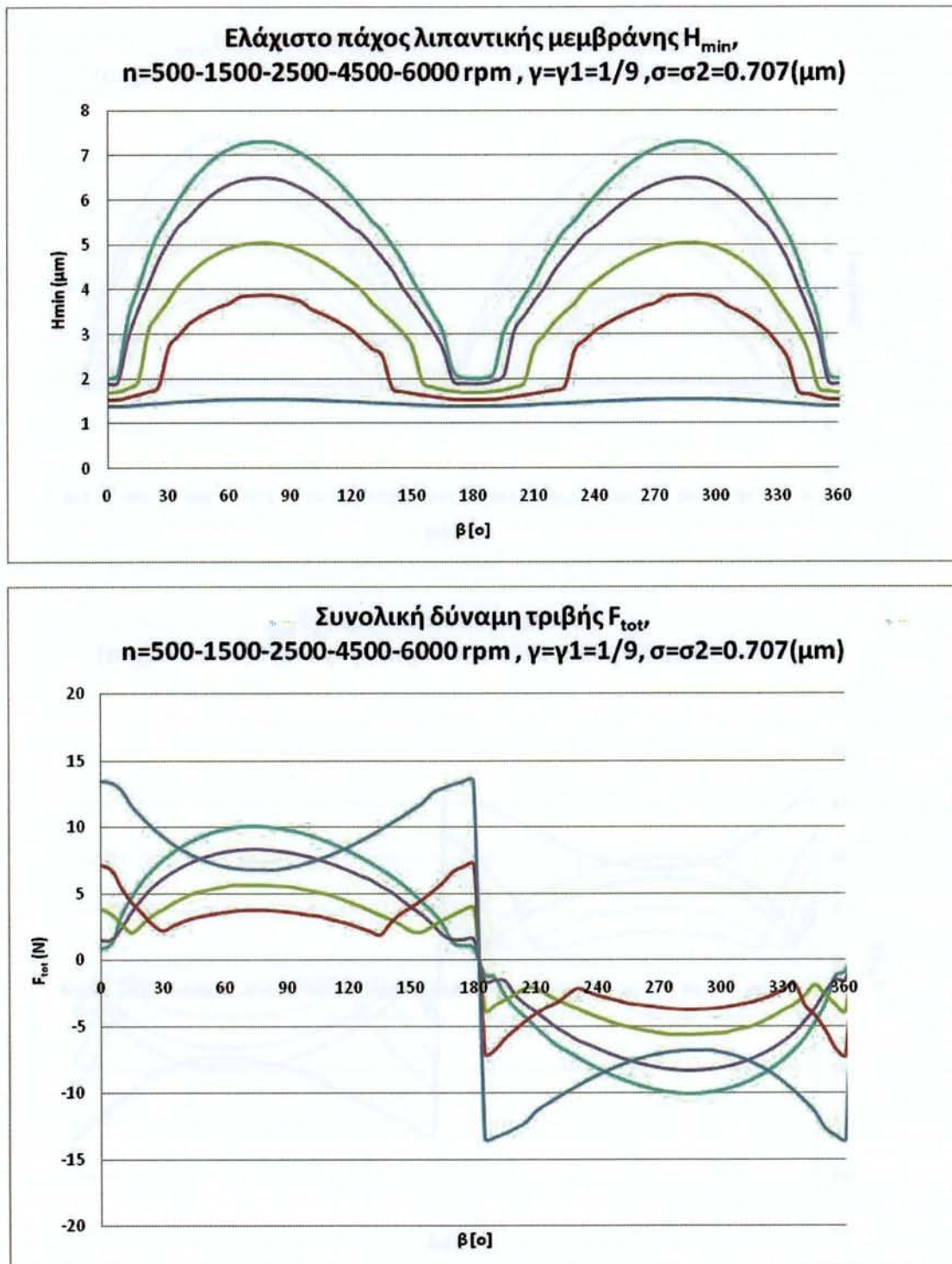
Σχήμα 3.2.30: Διάγραμματα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου, $\gamma=\gamma_1=\gamma_2=9$, $\sigma_1=\sigma_2$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για μη φθαρμένη τραχεία επιφάνεια, στο σταθερό καθώς και στο κινούμενο κομμάτι των επιφανειών που έρχονται σε επαφή, στον πρώτο δακτύλιο. Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm, χρώματος κόκκινου : $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου : $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ : $n=4500$ rpm, χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm.



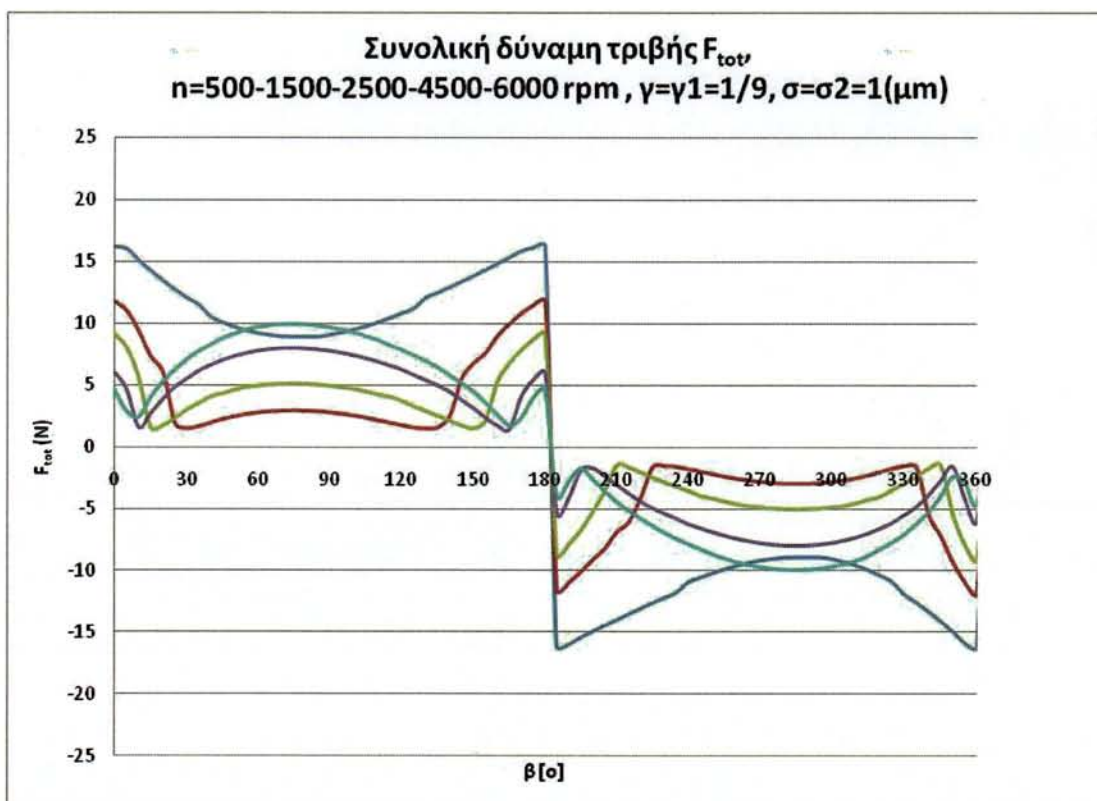
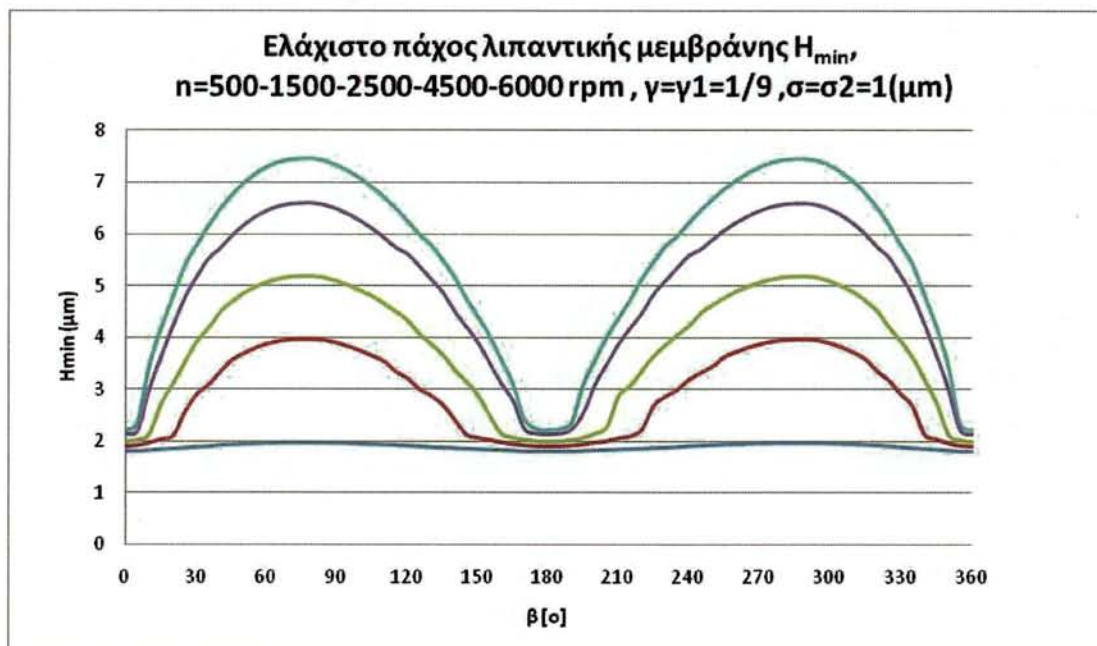
Σχήμα 3.2.31: Διάγραμμα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήση της γωνίας στροφαλοφόρου, $\gamma=\gamma_1=\gamma_2=9$, $\sigma_1=\sigma_2$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για μη φθαρμένη τραχεία επιφάνεια, στο σταθερό καθώς και στο κινούμενο κομμάτι των επιφανειών που έρχονται σε επαφή, στον πρώτο δακτύλιο. Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm, χρώματος κόκκινου: $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου: $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ: $n=4500$ rpm, χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm.



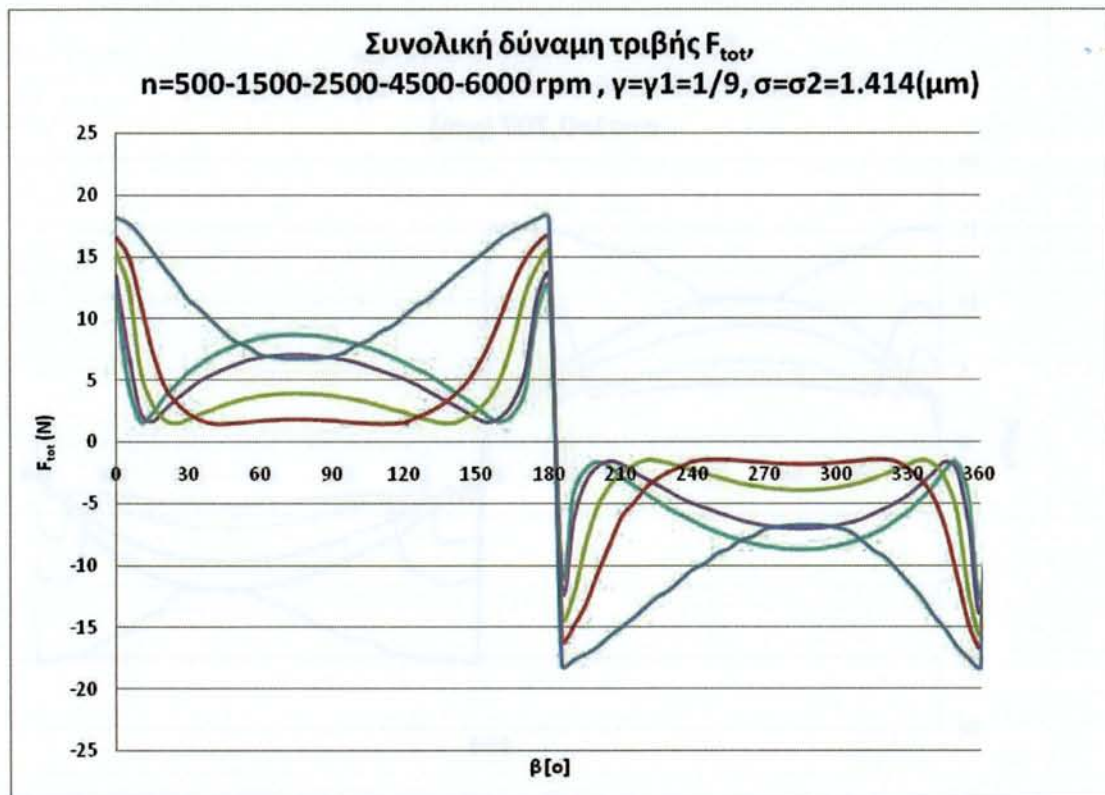
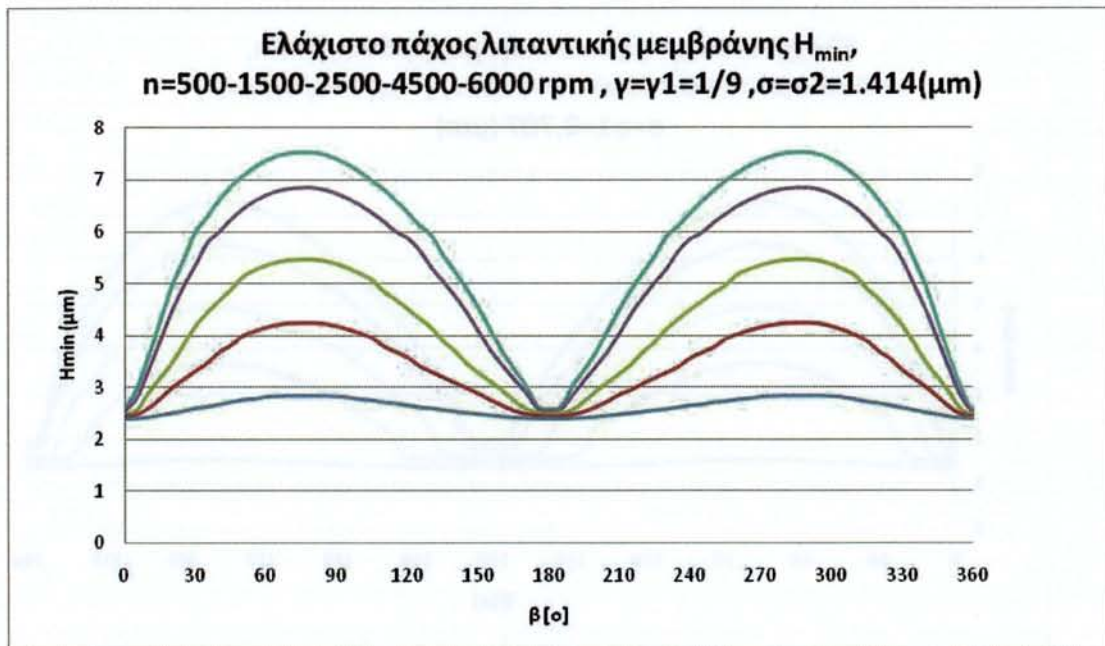
Σχήμα 3.2.32: Διάγραμμα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήση της γωνίας στροφαλοφόρου, $\gamma=\gamma_1=\gamma_2=9$, $\sigma_1=\sigma_2$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για μη φθαρμένη τραχεία επιφάνεια, στο σταθερό καθώς και στο κινούμενο κομμάτι των επιφανειών που έρχονται σε επαφή, στον πρώτο δακτύλιο. Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm, χρώματος κόκκινου : $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου : $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ : $n=4500$ rpm, χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm.



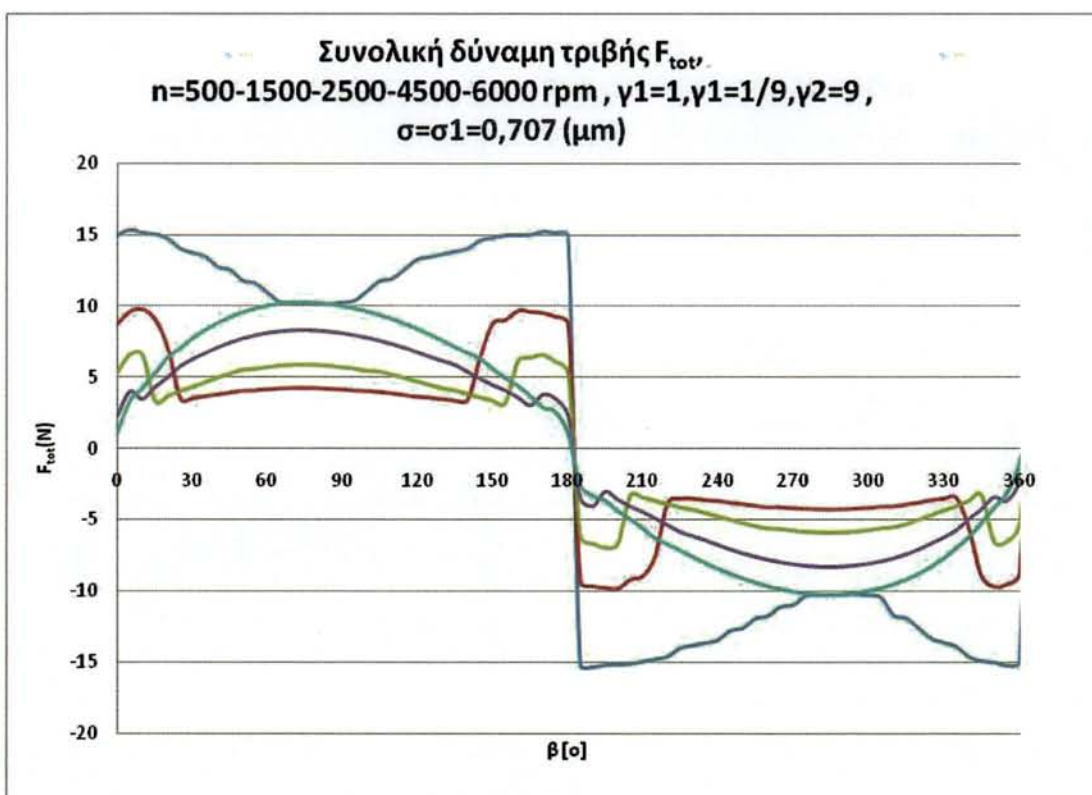
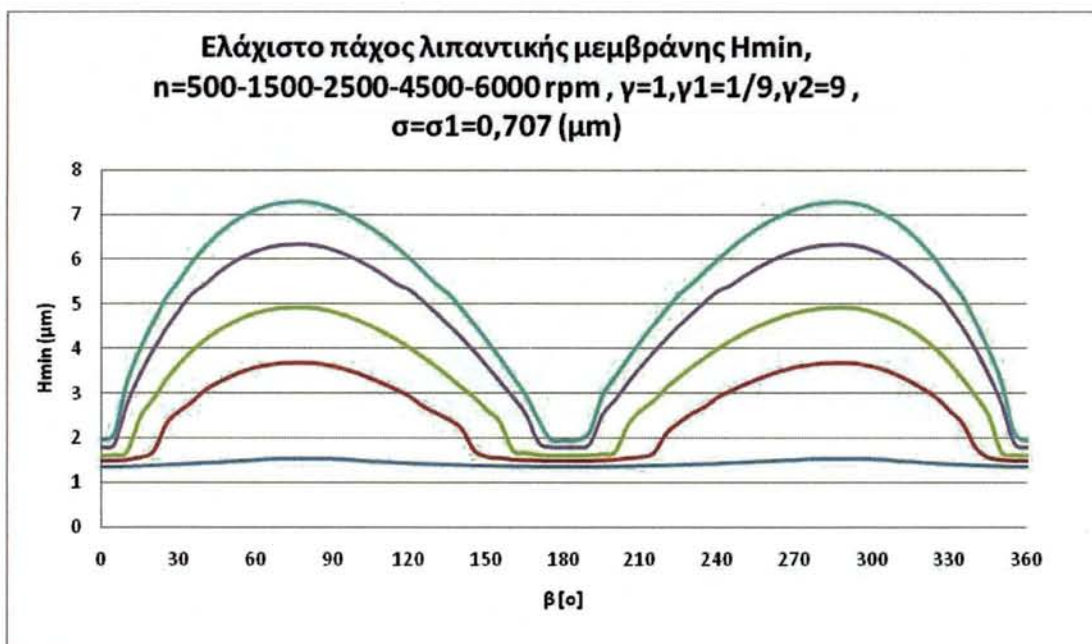
Σχήμα 3.2.33: Διάγραμματα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου $\gamma=\gamma_2=9$, $\sigma_1=0$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για μη φθαρμένη τραχεία επιφάνεια του πρώτου δακτυλίου. Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm , χρώματος κόκκινου: $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου: $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ: $n=4500$ rpm , χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm.



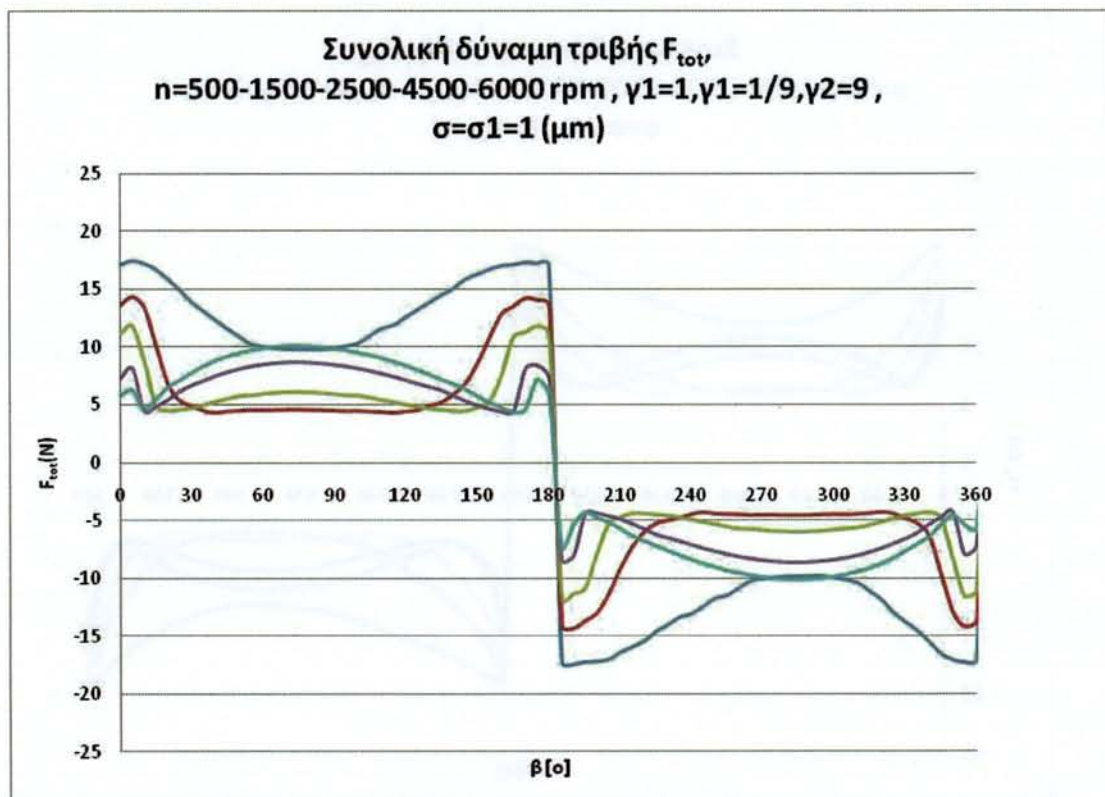
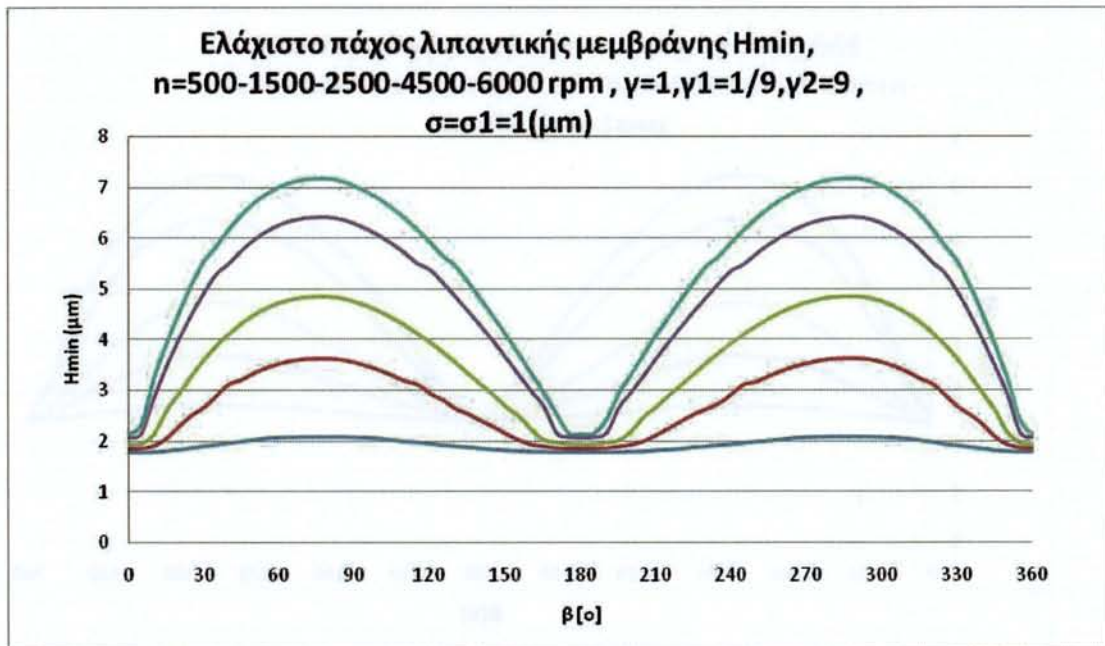
Σχήμα 3.2.34: Διάγραμματα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήση της γωνίας στροφαλοφόρου $\gamma = \gamma_2 = 9, \sigma_1 = 0$, $n=500-1500-2500-4500-6000 \text{ rpm}$ για μη φθαρμένη τραχεία επιφάνεια του πρώτου δακτυλίου. Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500 \text{ rpm}$, χρώματος κόκκινου: $n=1500 \text{ rpm}$, χρώματος πράσινου: $n=2500 \text{ rpm}$, χρώματος μώβ: $n=4500 \text{ rpm}$, χρώματος γαλάζιου : $n=6000 \text{ rpm}$.



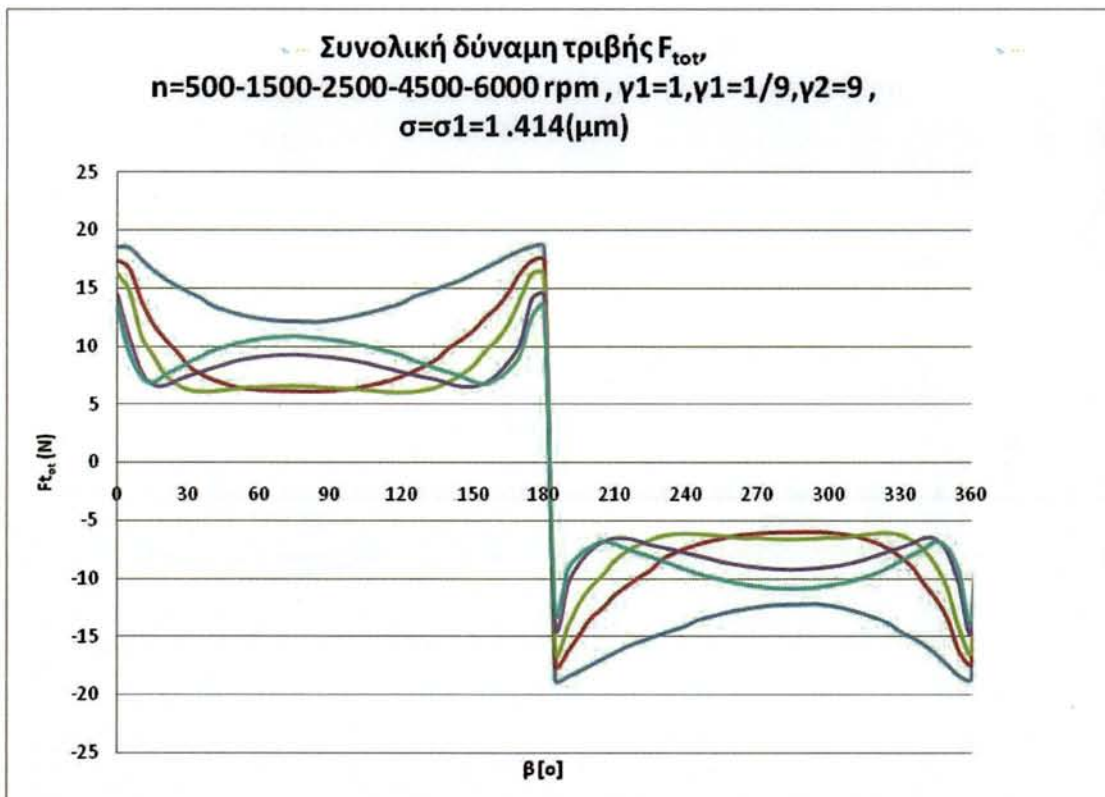
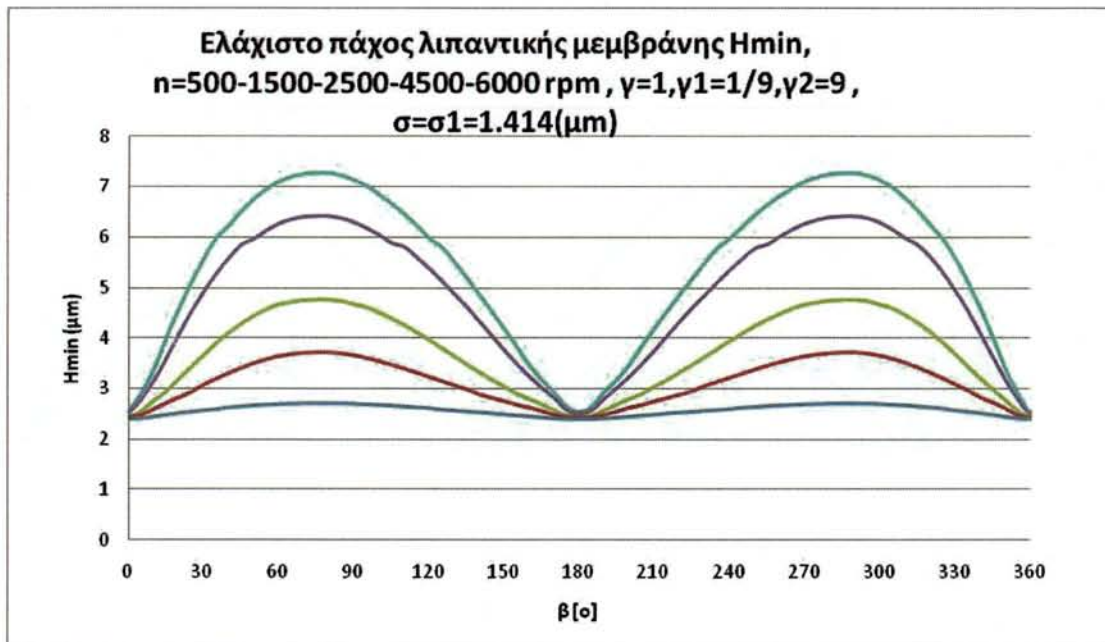
Σχήμα 3.2.35: Διάγραμμα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήση της γωνίας στροφαλοφόρου $\gamma=\gamma_2=9$, $\sigma_1=0$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για μη φθαρμένη τραχεία επιφάνεια του πρώτου δακτυλίου. Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm , χρώματος κόκκινου: $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου: $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ: $n=4500$ rpm , χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm.



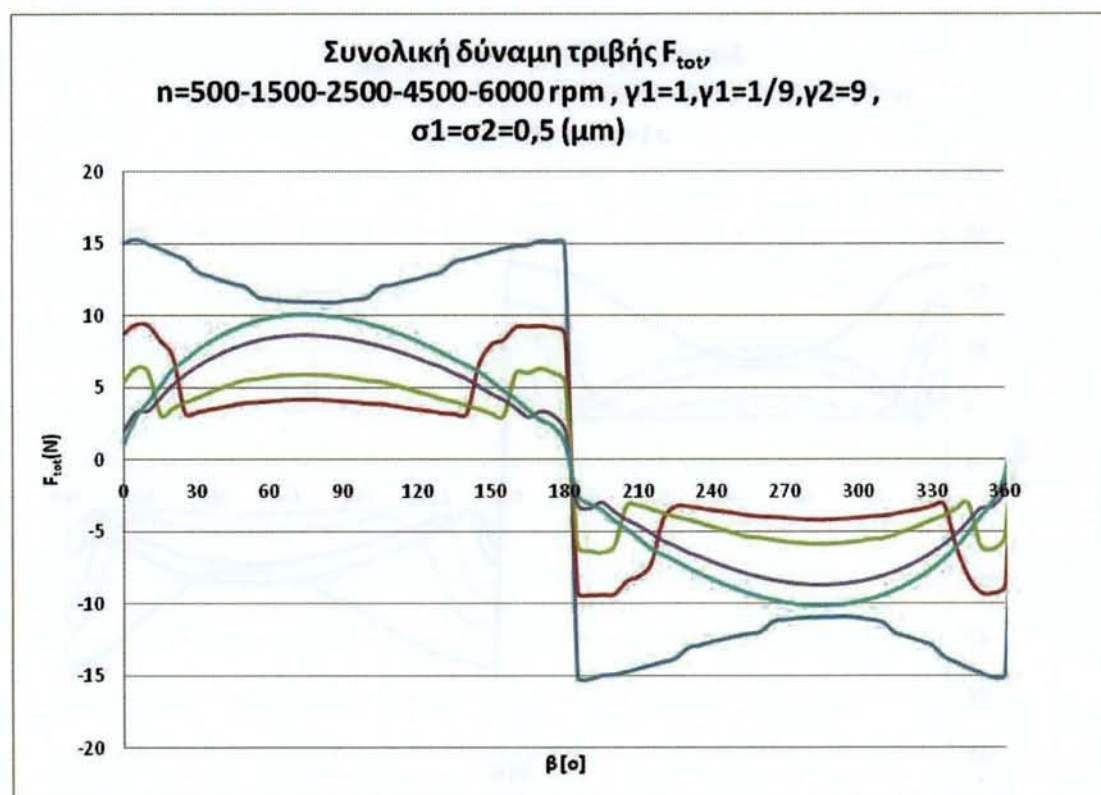
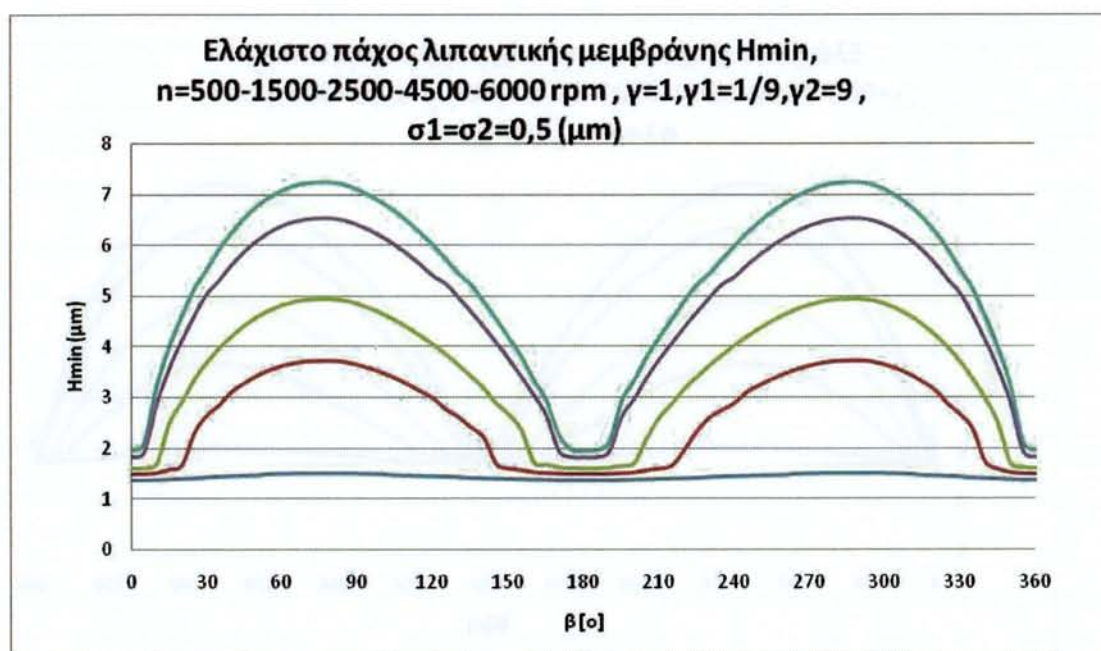
Σχήμα 3.2.36: Διάγραμμα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήση της γωνίας στροφαλοφόρου $\gamma=\gamma_1=9$, $\sigma_2=0$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για ελαφρώς φθαρμένη τραχεία επιφάνεια πρώτου δακτυλίου. Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm, χρώματος κόκκινου : $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου : $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ : $n=4500$ rpm, χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm.



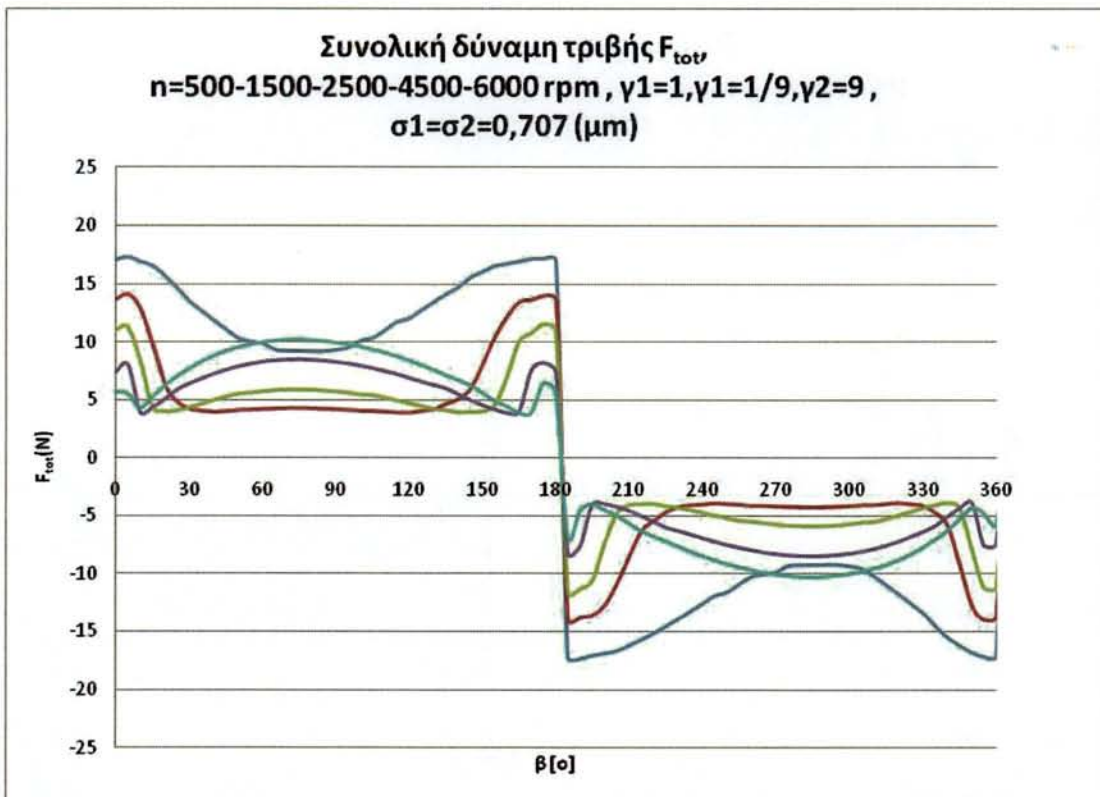
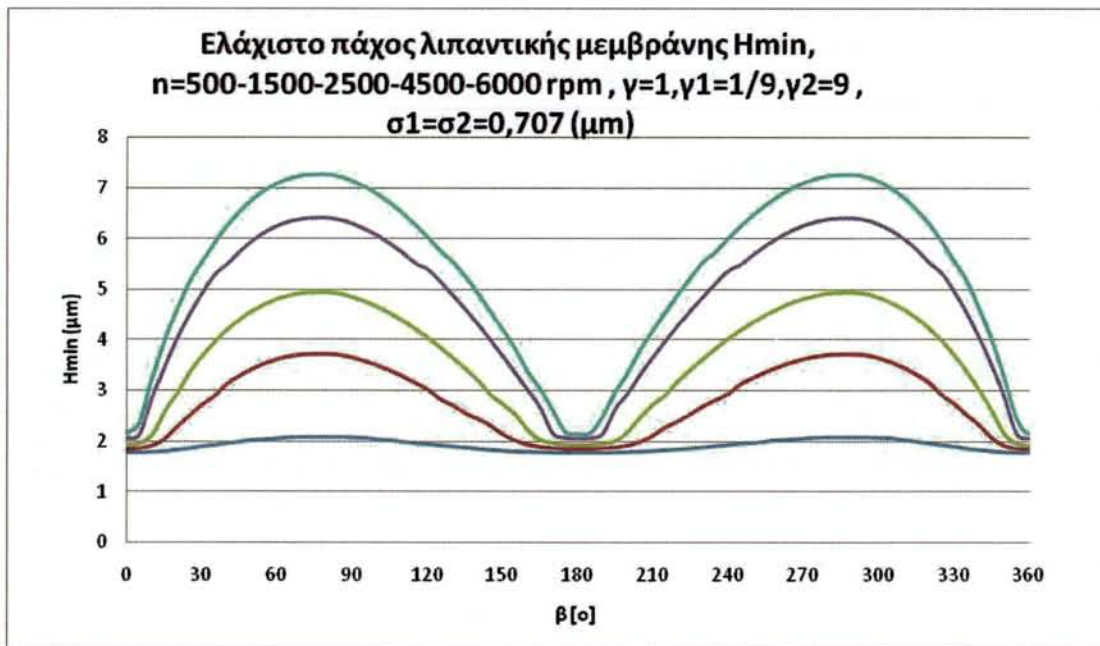
Σχήμα 3.2.37: Διάγραμματα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήση της γωνίας στροφαλοφόρου $\gamma=\gamma_1=9$, $\sigma_2=0$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για ελαφρώς φθαρμένη τραχεία επιφάνεια πρώτου δακτυλίου. Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm , χρώματος κόκκινου: $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου: $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ: $n=4500$ rpm , χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm.



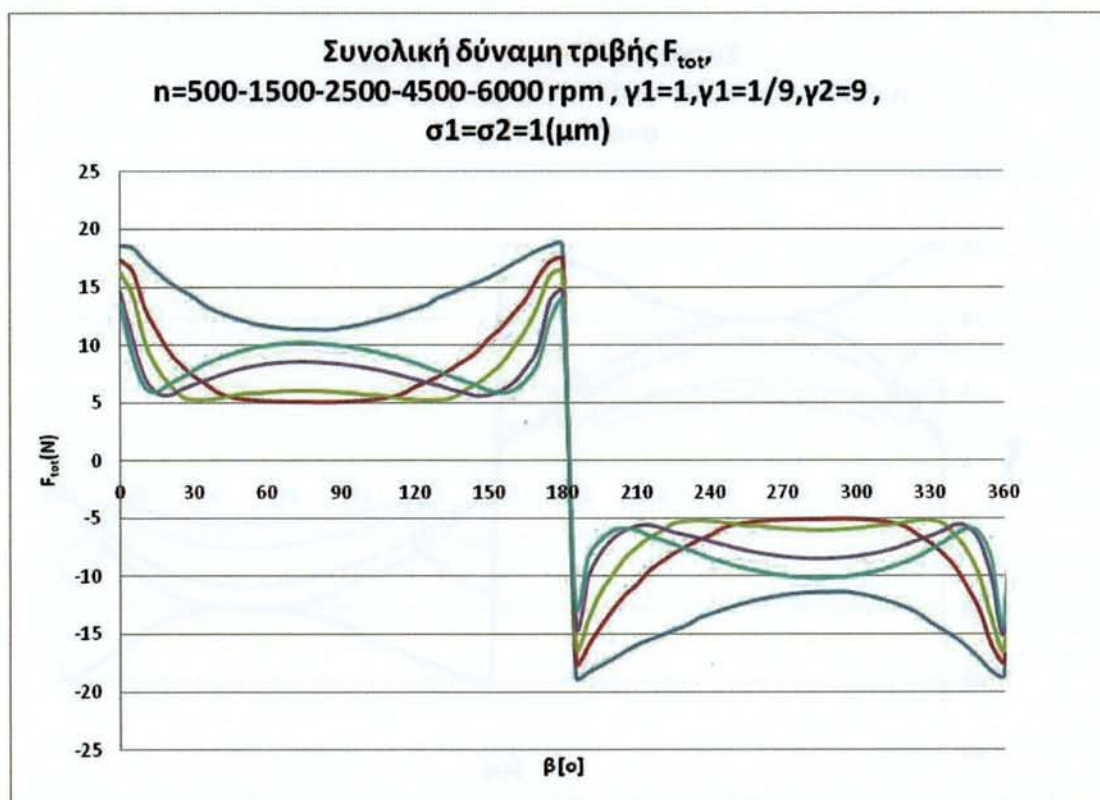
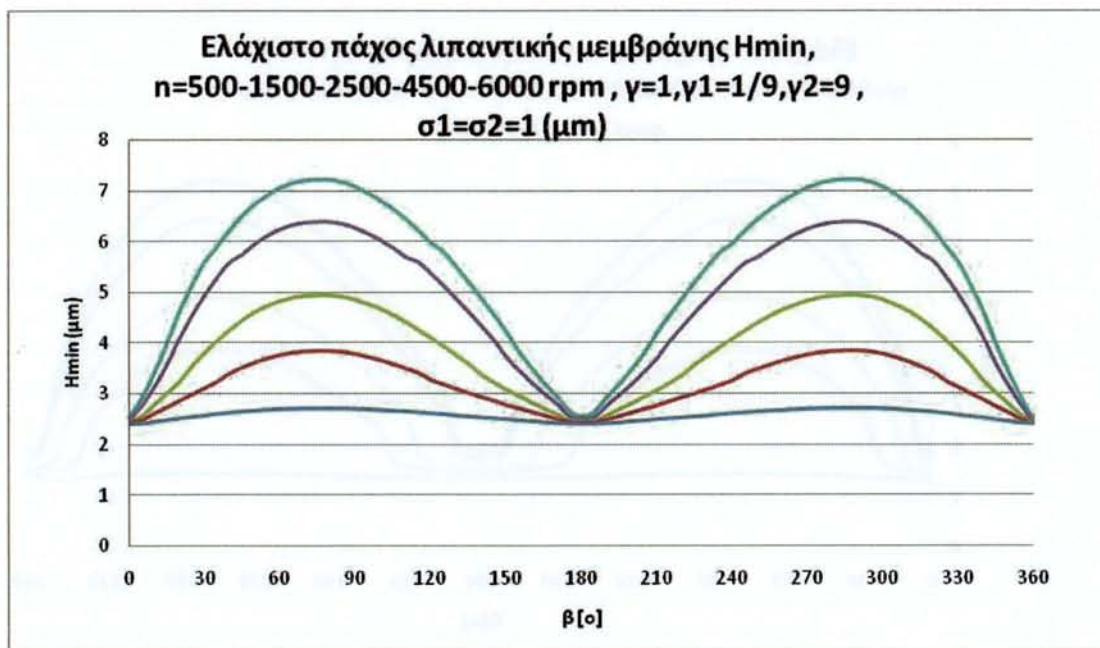
Σχήμα 3.2.38: Διάγραμμα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήσεως της γωνίας στροφαλοφόρου $\gamma=\gamma_1=9$, $\sigma_2=0$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για ελαφρώς φθαρμένη τραχεία επιφάνεια πρώτου δακτυλίου. Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm, χρώματος κόκκινου: $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου: $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ: $n=4500$ rpm, χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm.



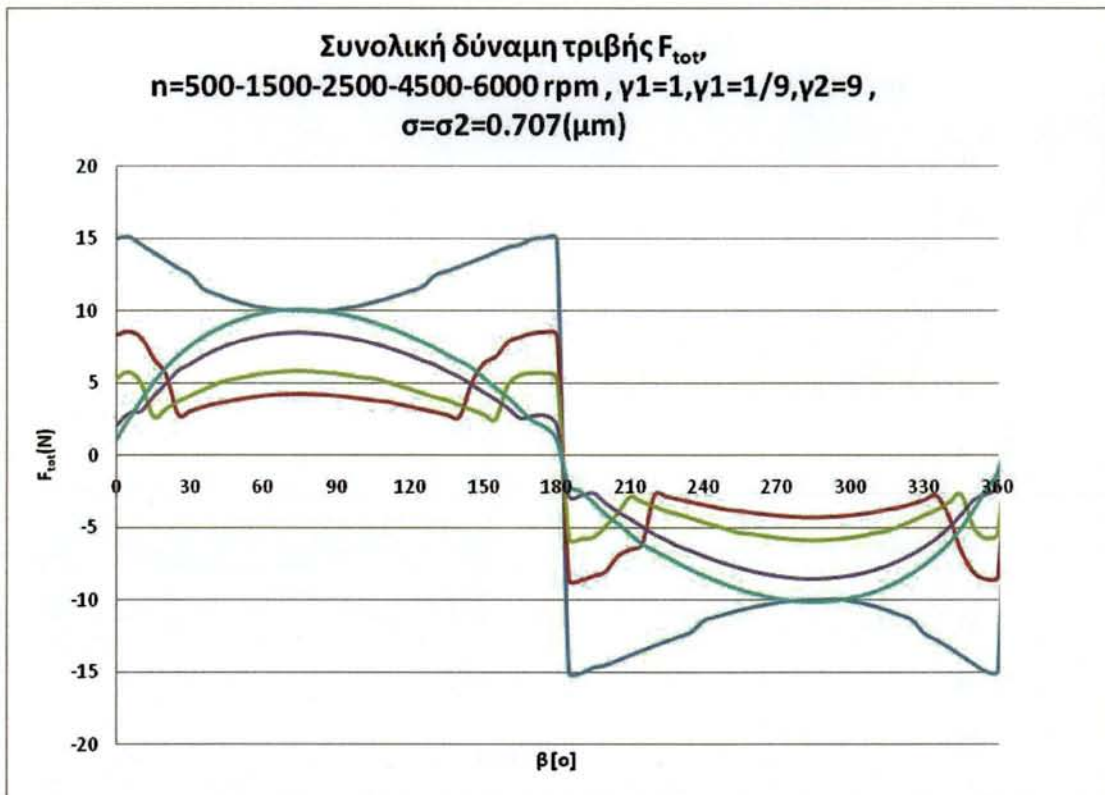
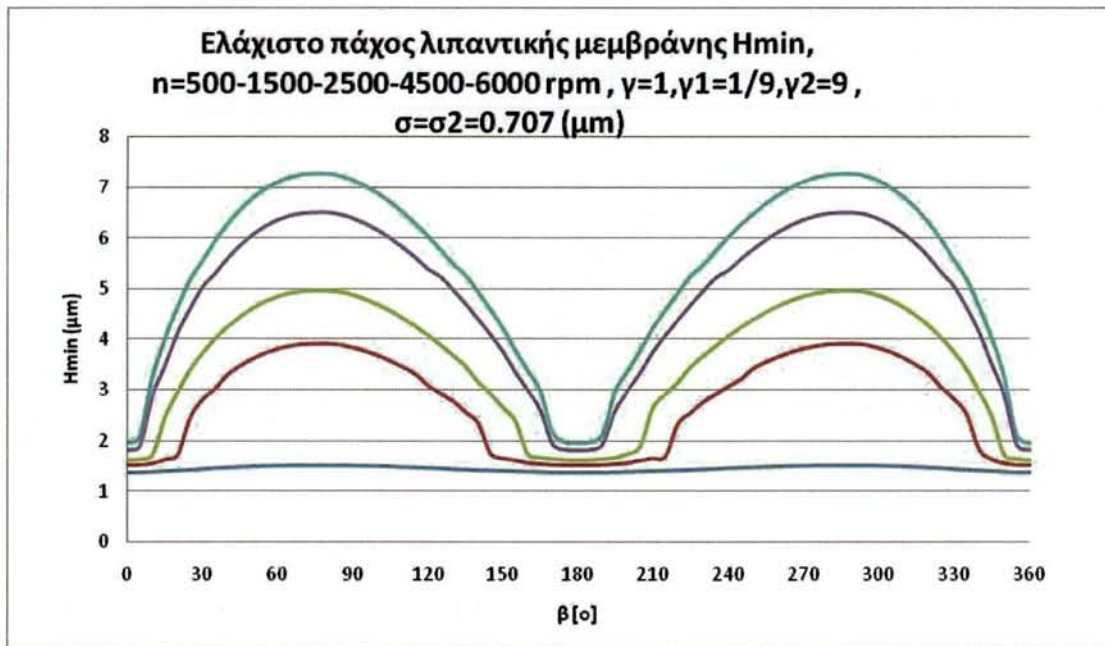
Σχήμα 3.2.39: Διάγραμματα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήση της γωνίας στροφαλοφόρου, $\gamma=\gamma_1=\gamma_2=9, \sigma_1=\sigma_2$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για μη φθαρμένη τραχεία επιφάνεια ,στο σταθερό καθώς και στο κινούμενο κομμάτι των επιφανειών που έρχονται σε επαφή , στον πρώτο δακτύλιο .Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm , χρώματος κόκκινου: $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου: $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ: $n=4500$ rpm , χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm.



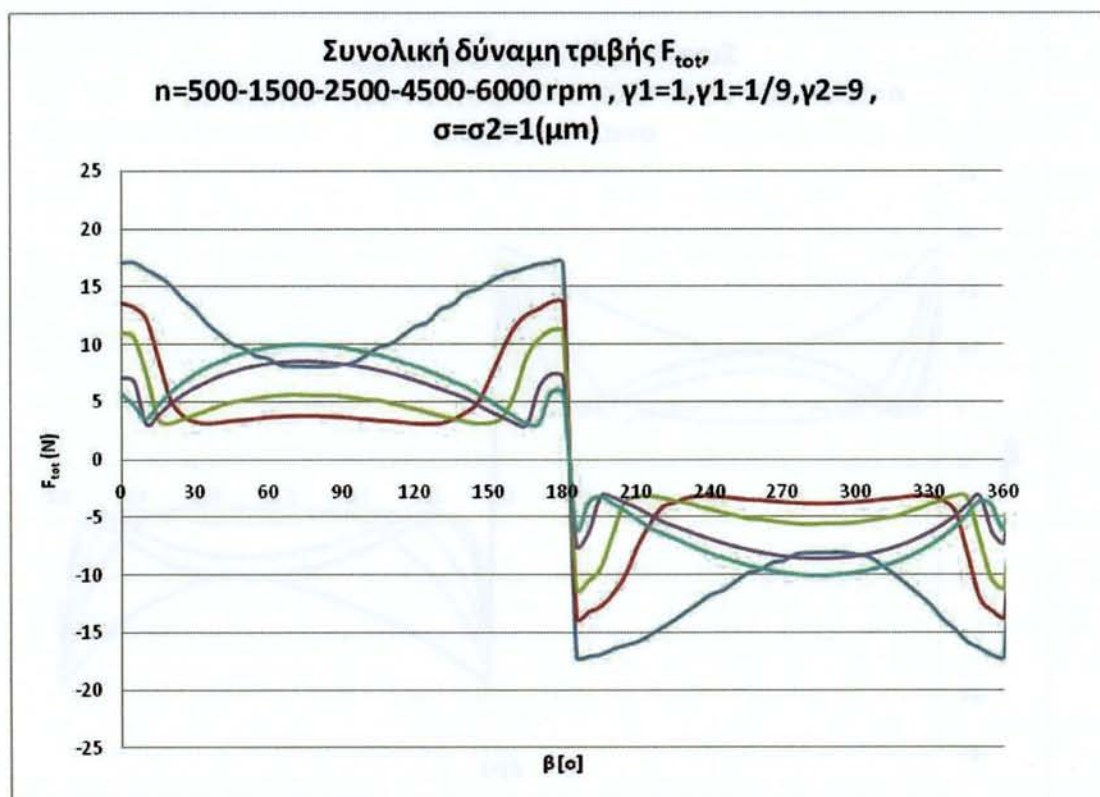
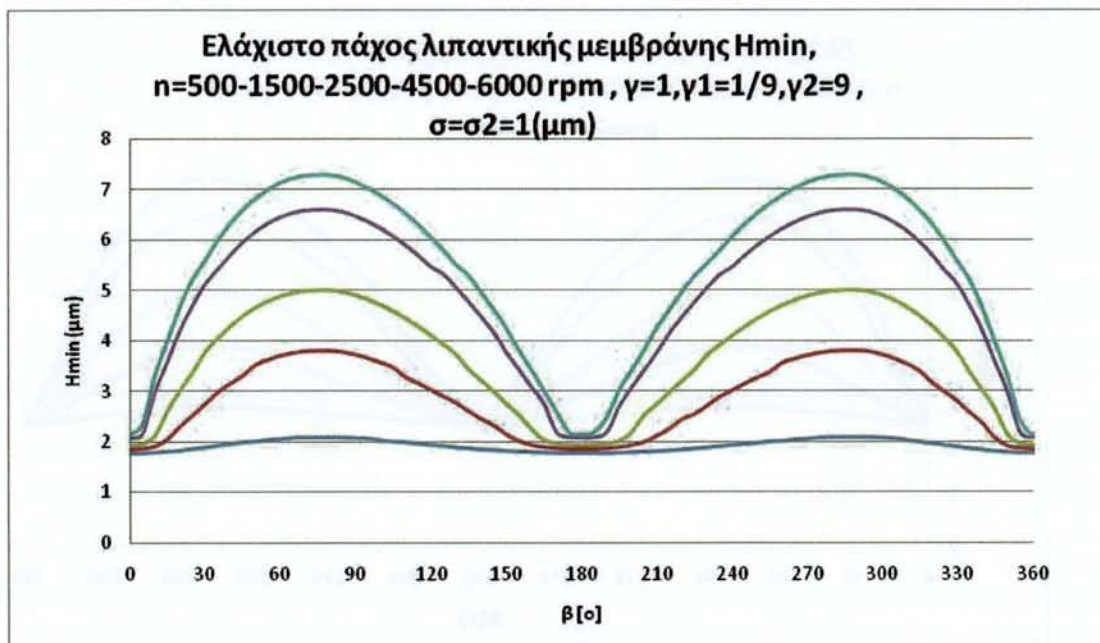
Σχήμα 3.2.40: Διάγραμματα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήση της γωνίας στροφαλοφόρου, $\gamma=\gamma_1=\gamma_2=9, \sigma_1=\sigma_2$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για μη φθαρμένη τραχεία επιφάνεια ,στο σταθερό καθώς και στο κινούμενο κομμάτι των επιφανειών που έρχονται σε επαφή , στον πρώτο δακτύλιο .Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm , χρώματος κόκκινου : $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου : $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ : $n=4500$ rpm , χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm.



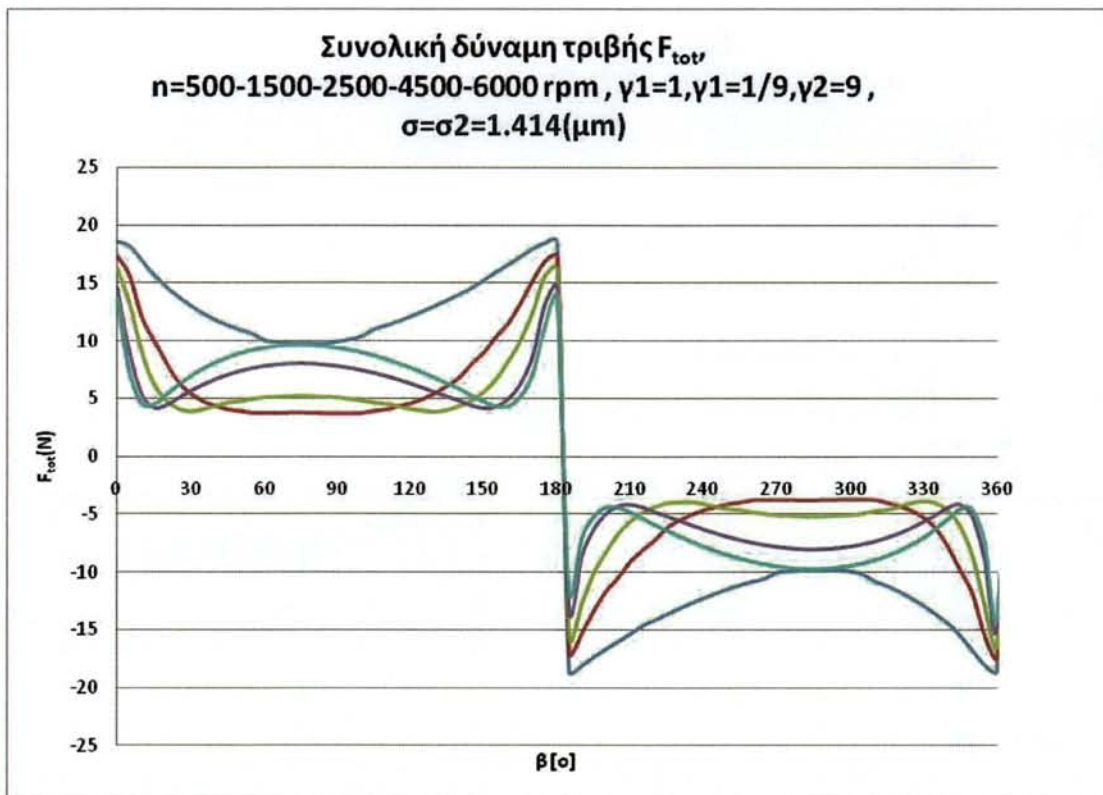
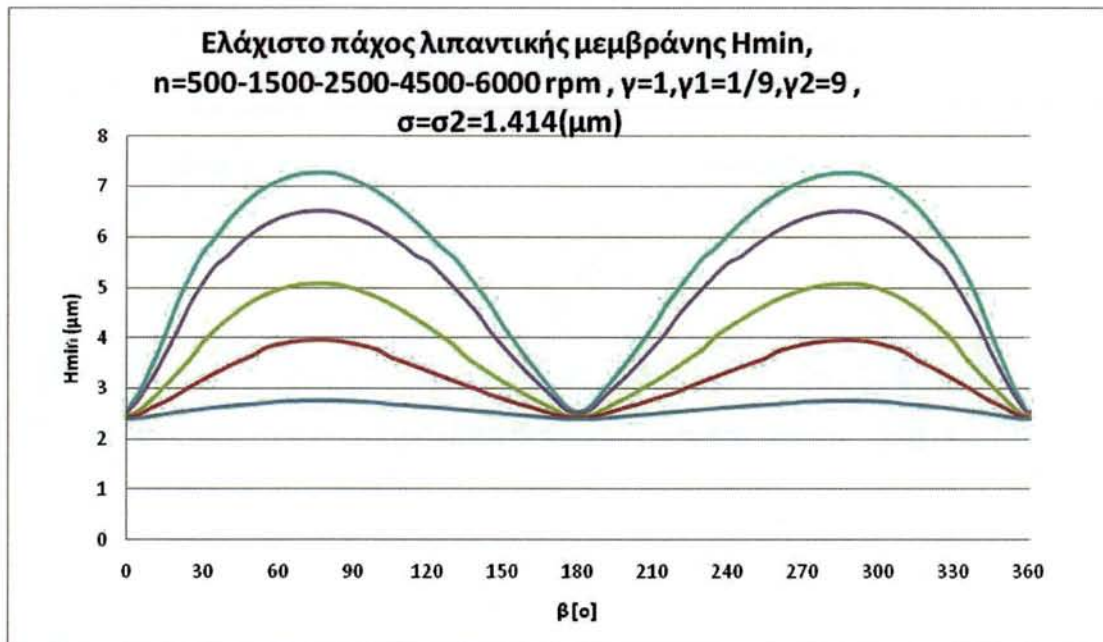
Σχήμα 3.2.41: Διάγραμματα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήση της γωνίας στροφαλοφόρου, $\gamma=\gamma_1=\gamma_2=9, \sigma_1=\sigma_2$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για μη φθαρμένη τραχεία επιφάνεια, στο σταθερό καθώς και στο κινούμενο κομμάτι των επιφανειών που έρχονται σε επαφή, στον πρώτο δακτύλιο. Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm, χρώματος κόκκινου: $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου: $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ: $n=4500$ rpm, χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm.



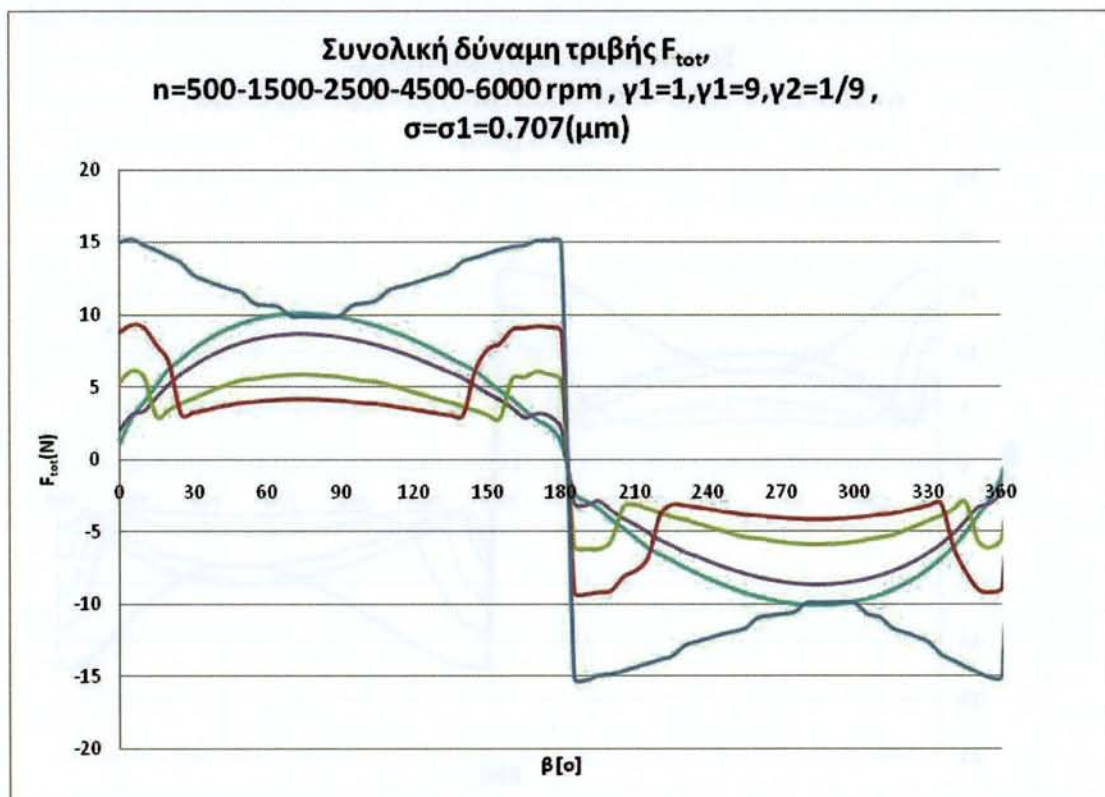
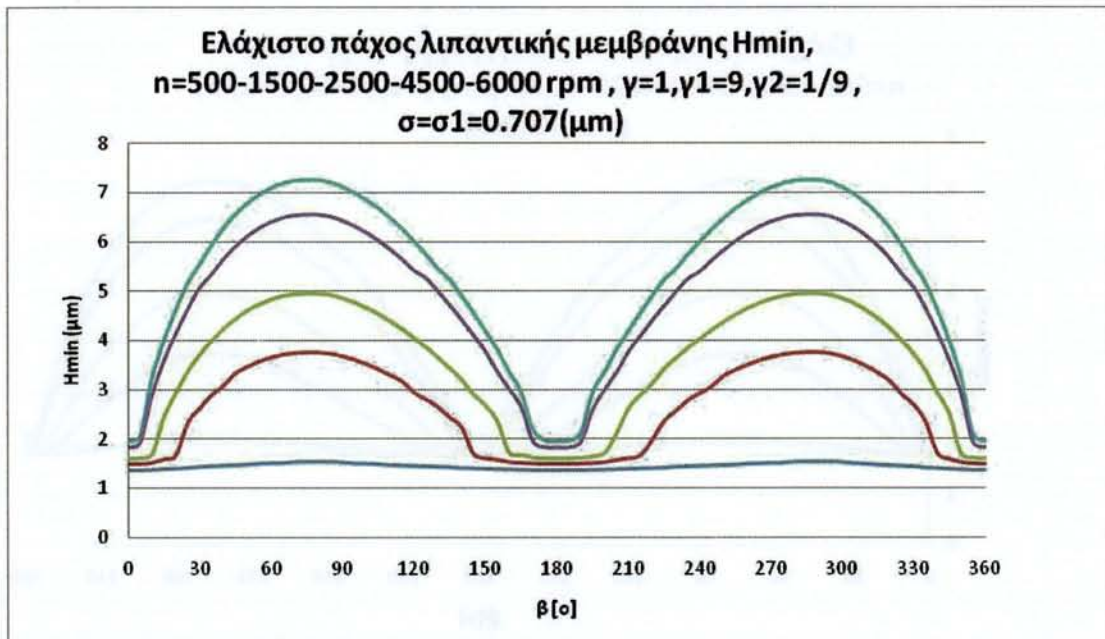
Σχήμα 3.2.42: Διάγραμμα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου $\gamma = \gamma_2 = 9, \sigma_1 = 0$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για μη φθαρμένη τραχεία επιφάνεια του πρώτου δακτυλίου. Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm, χρώματος κόκκινου: $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου: $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ: $n=4500$ rpm, χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm.



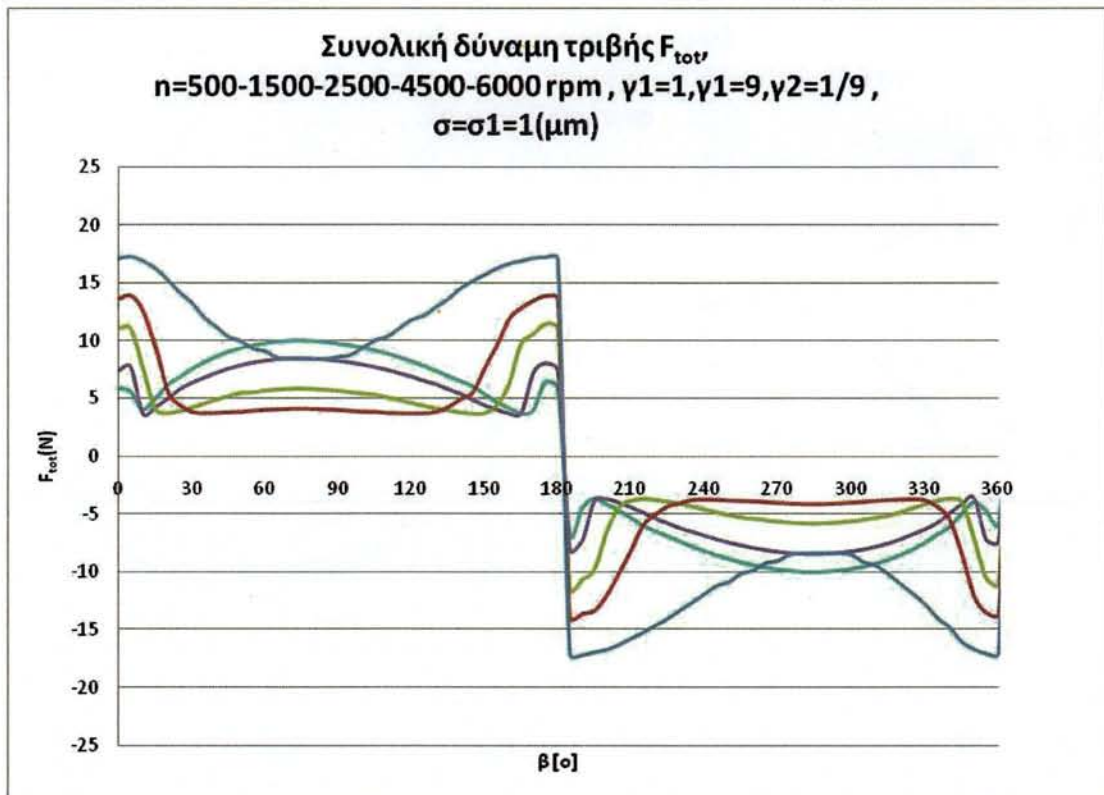
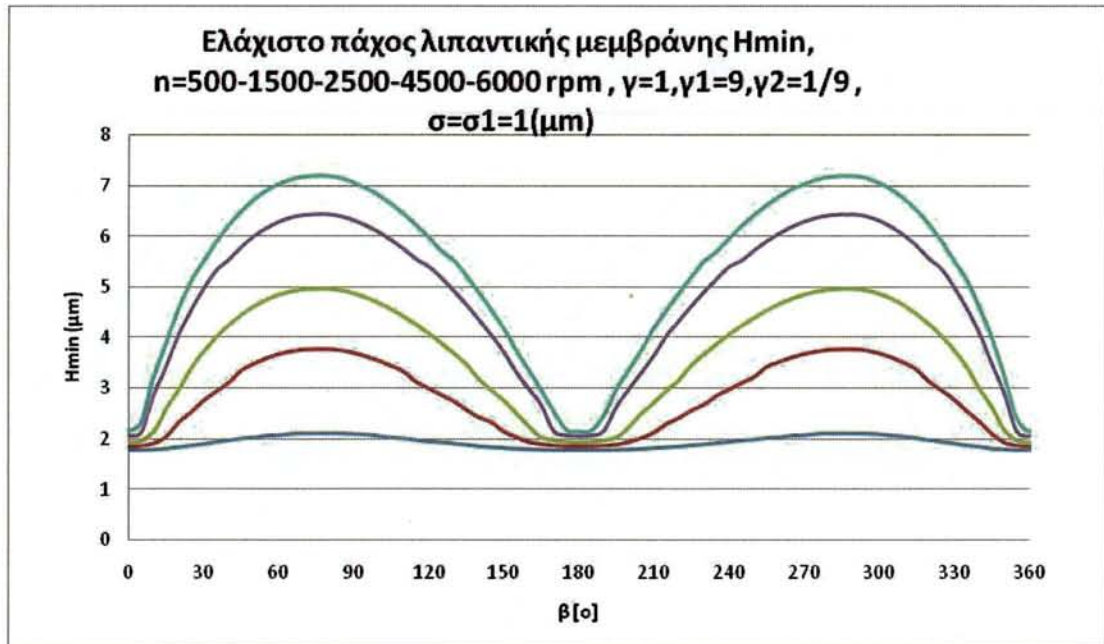
Σχήμα 3.2.43: Διάγραμμα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου $\gamma=\gamma_2=9, \sigma_1=0$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για μη φθαρμένη τραχεία επιφάνεια του πρώτου δακτυλίου. Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm, χρώματος κόκκινου: $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου: $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ: $n=4500$ rpm, χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm.



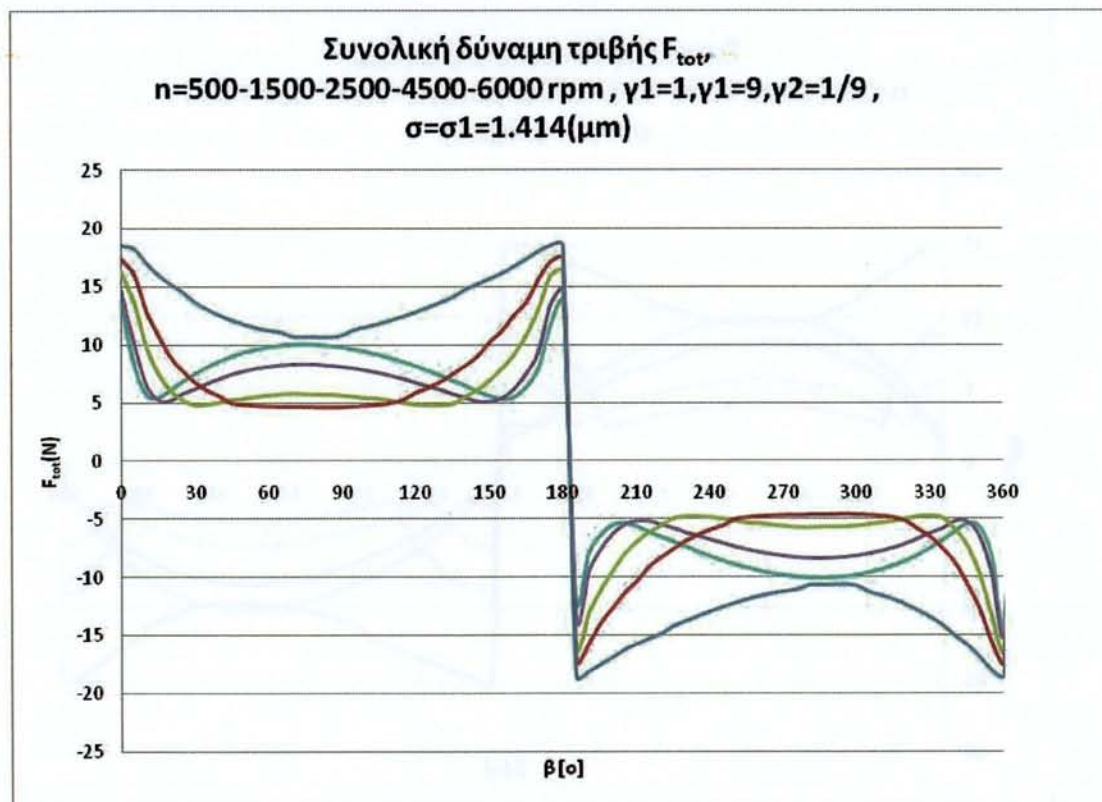
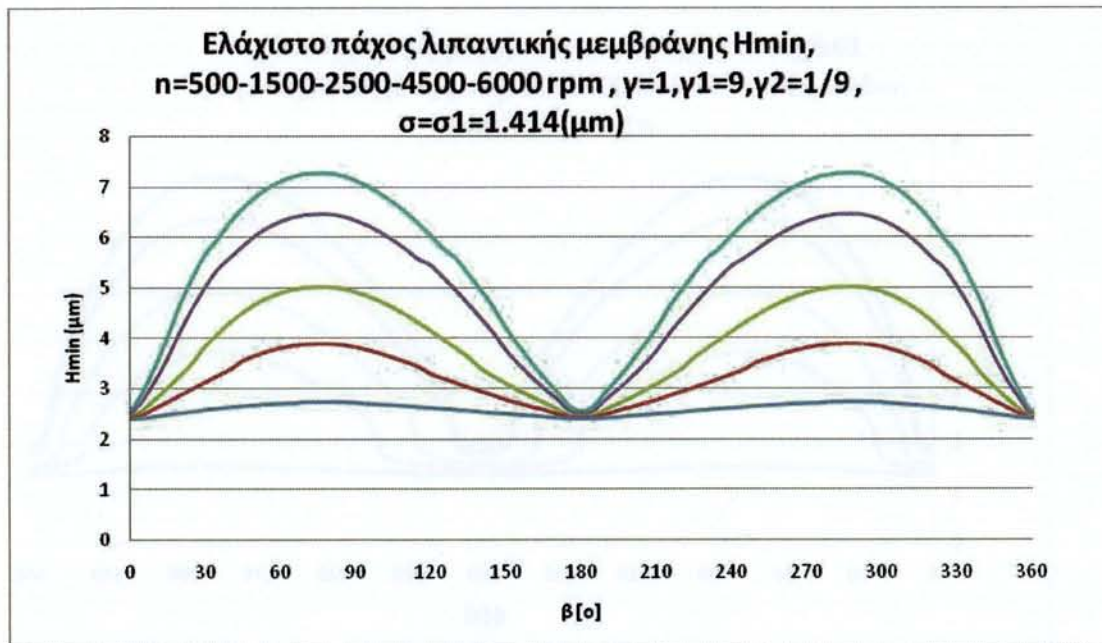
Σχήμα 3.2.44: Διάγραμμα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήση της γωνίας στροφαλοφόρου $\gamma = \gamma_2 = 9, \sigma_1 = 0$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για μη φθαρμένη τραχεία επιφάνεια του πρώτου δακτυλίου. Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm, χρώματος κόκκινου: $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου: $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ: $n=4500$ rpm, χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm.



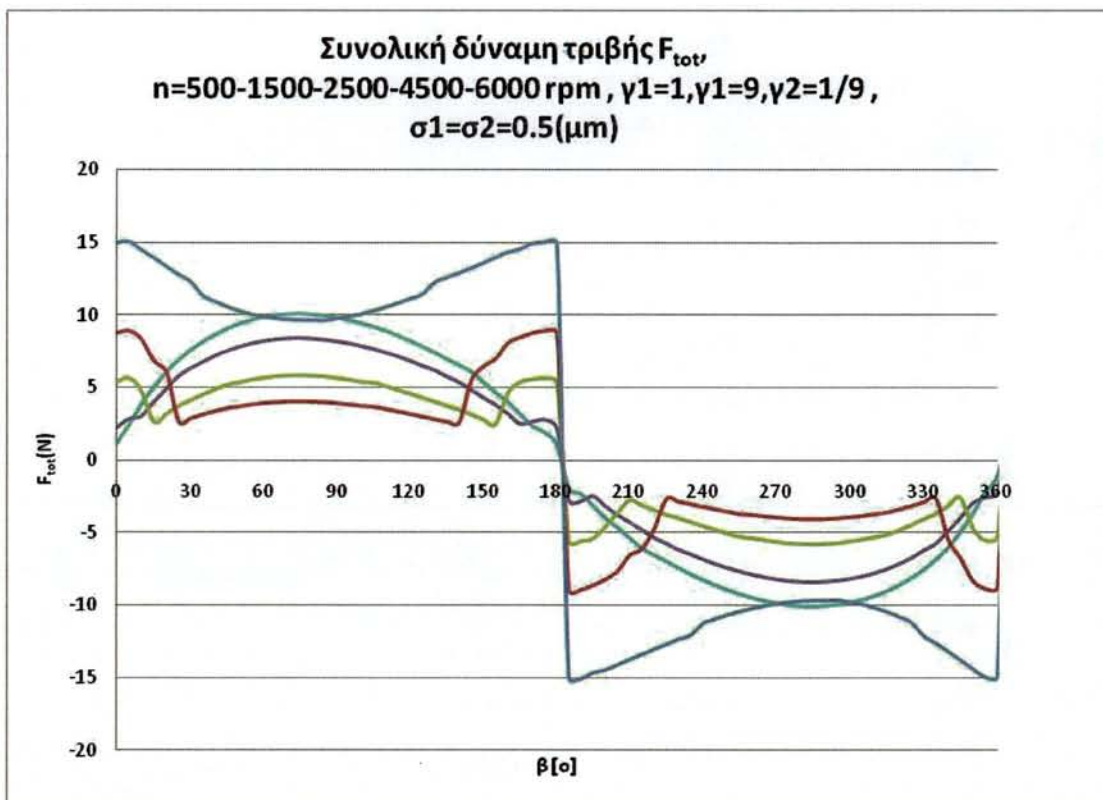
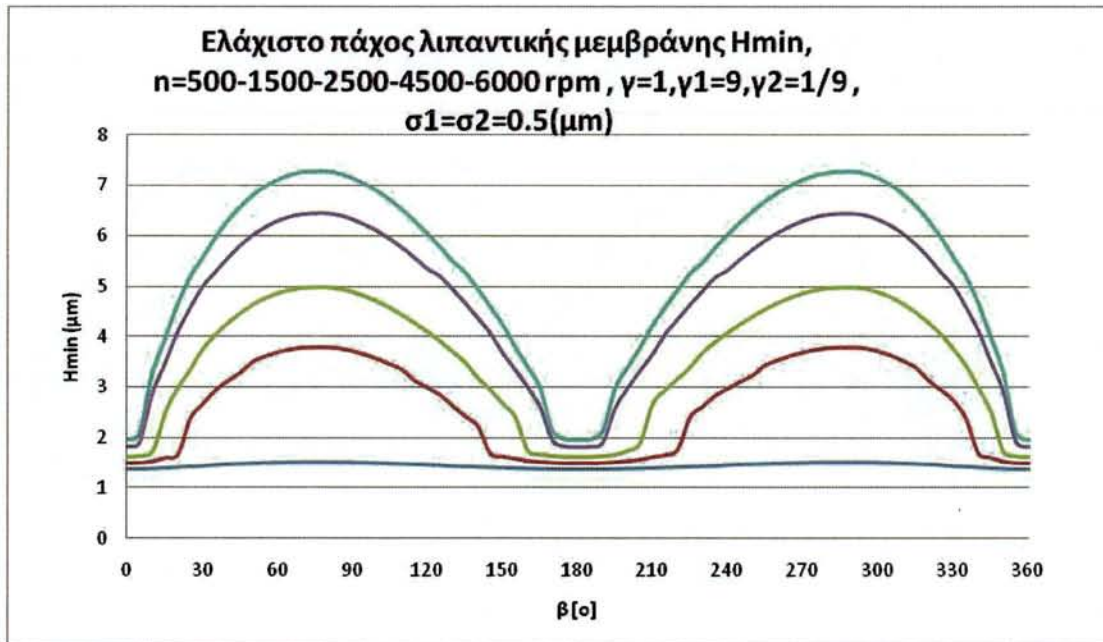
Σχήμα 3.2.45: Διάγραμμα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήση της γωνίας στροφαλοφόρου $\gamma=\gamma_1=9$, $\sigma_2=0$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για ελαφρώς φθαρμένη τραχεία επιφάνεια πρώτου δακτυλίου. Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm, χρώματος κόκκινου: $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου: $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ: $n=4500$ rpm, χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm.



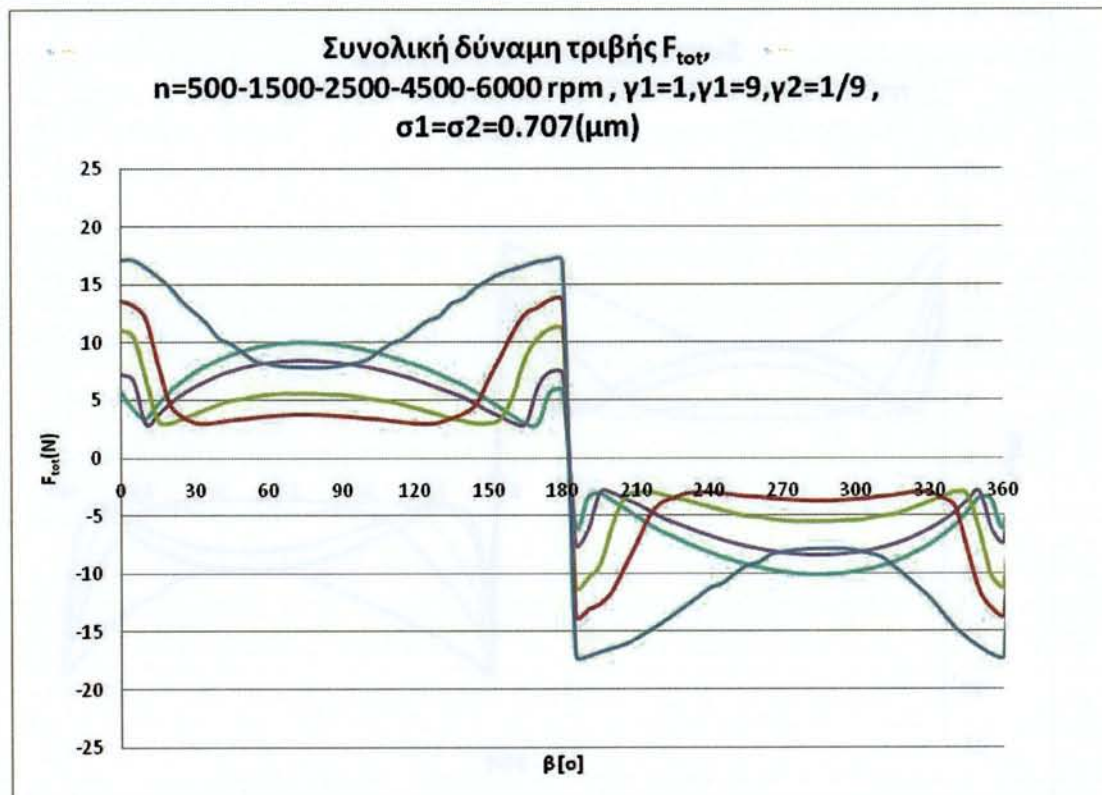
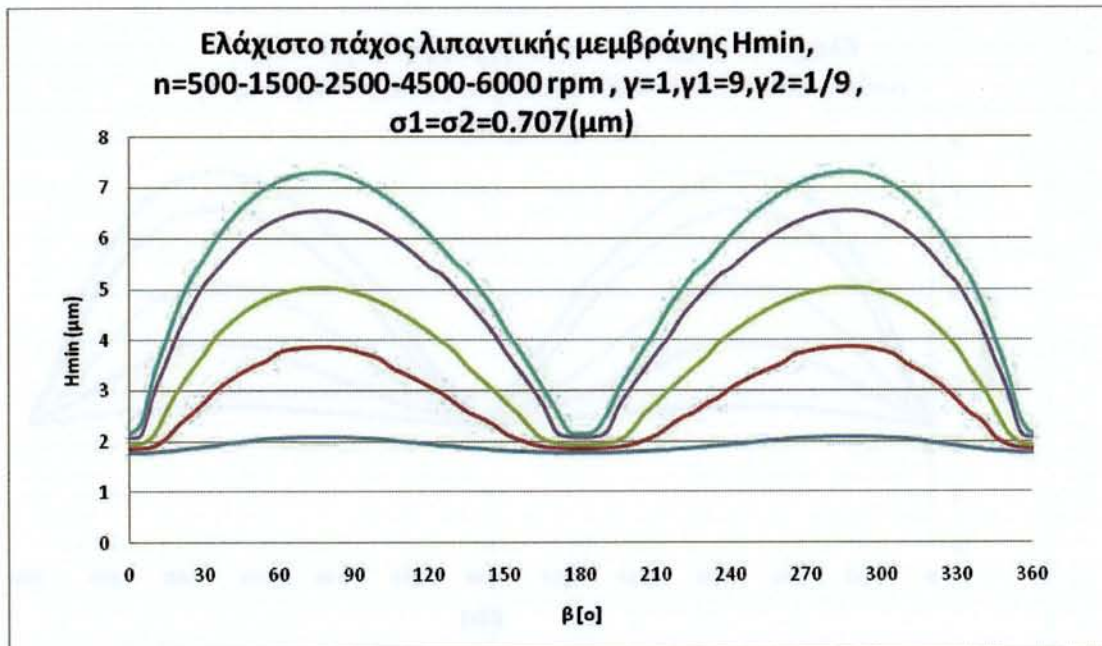
Σχήμα 3.2.46: Διάγραμματα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήση της γωνίας στροφαλοφόρου $\gamma=\gamma_1=9$, $\sigma_2=0$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για ελαφρώς φθαρμένη τραχεία επιφάνεια πρώτου δακτυλίου. Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm, χρώματος κόκκινου: $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου: $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ: $n=4500$ rpm, χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm.



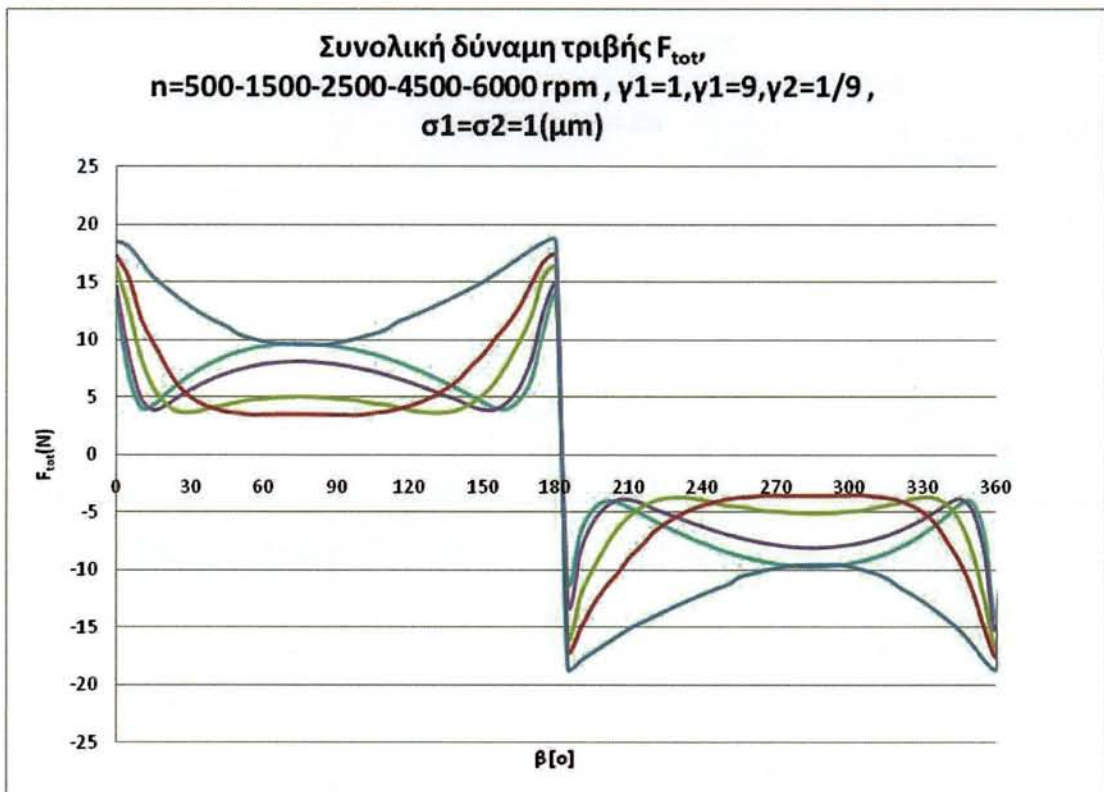
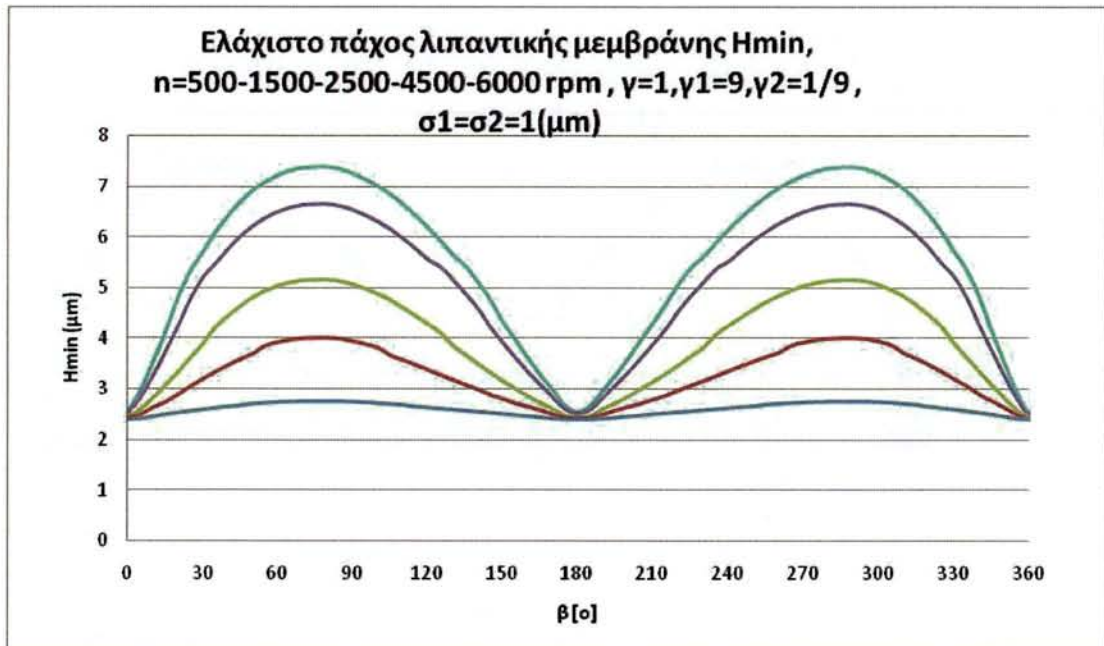
Σχήμα 3.2.47: Διάγραμμα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήρηση της γωνίας στροφαλοφόρου $\gamma=\gamma_1=9$, $\sigma_2=0$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για ελαφρώς φθαρμένη τραχεία επιφάνεια πρώτου δακτυλίου. Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm, χρώματος κόκκινου: $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου: $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ: $n=4500$ rpm, χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm.



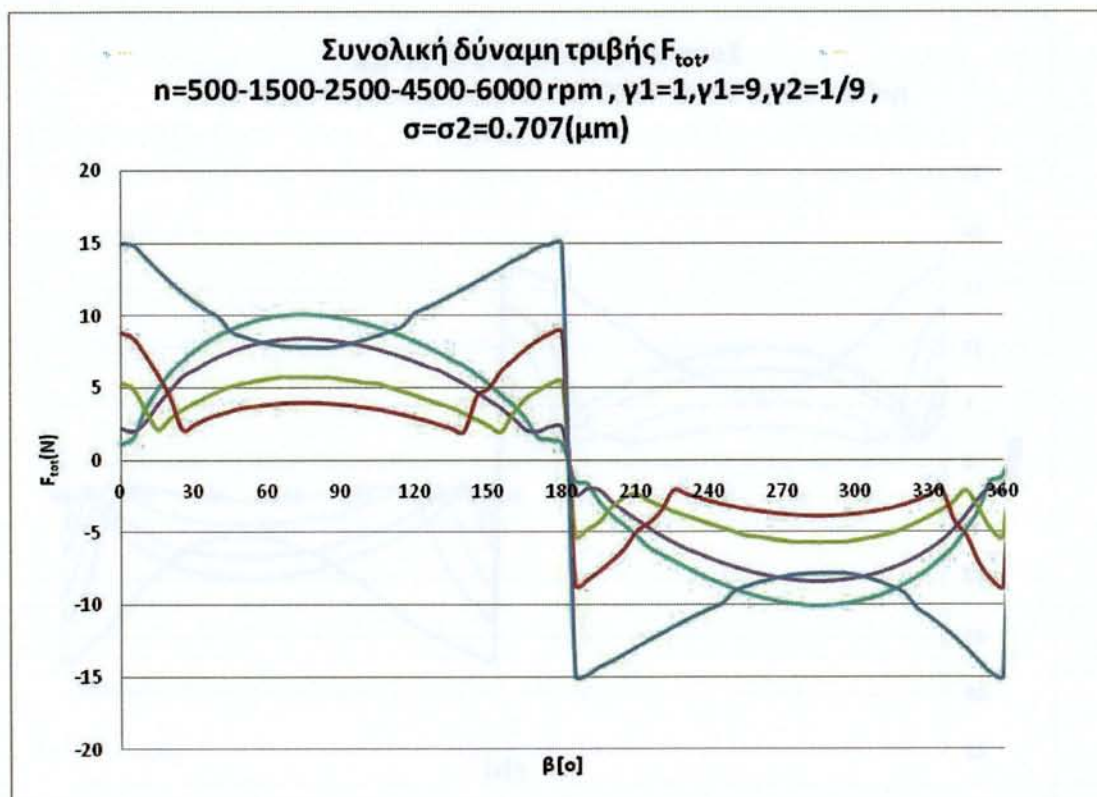
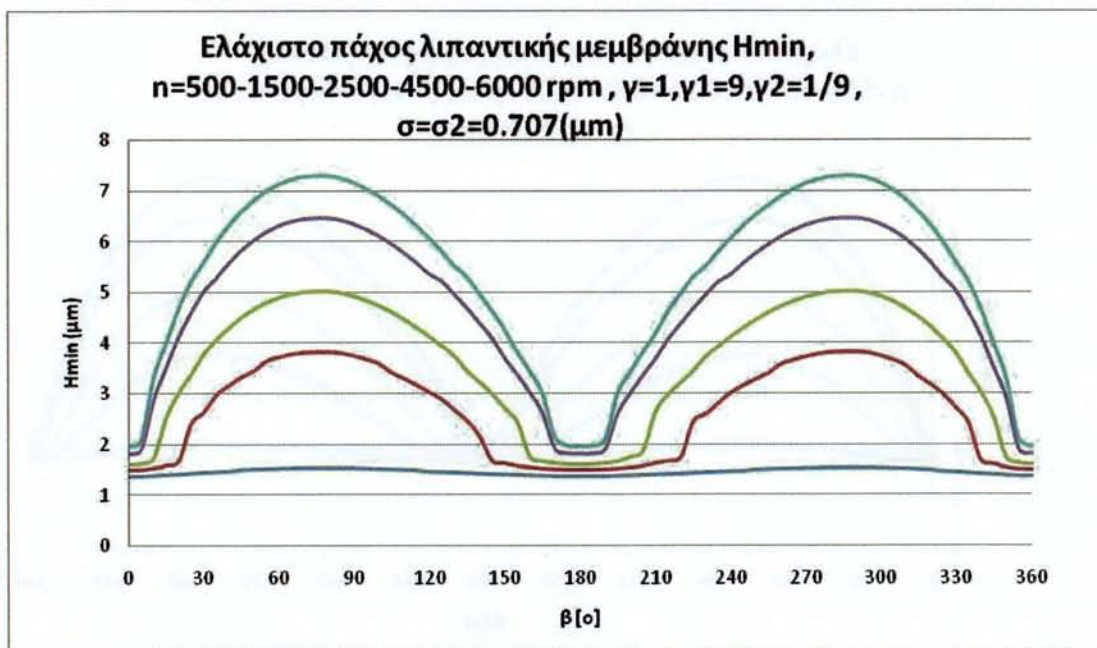
Σχήμα 3.2.48: Διάγραμμα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου, $\gamma=\gamma_1=\gamma_2=9, \sigma_1=\sigma_2$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για μη φθαρμένη τραχεία επιφάνεια, στο σταθερό καθώς και στο κινούμενο κομμάτι των επιφανειών που έρχονται σε επαφή, στον πρώτο δακτύλιο. Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm, χρώματος κόκκινου: $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου: $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ: $n=4500$ rpm, χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm.



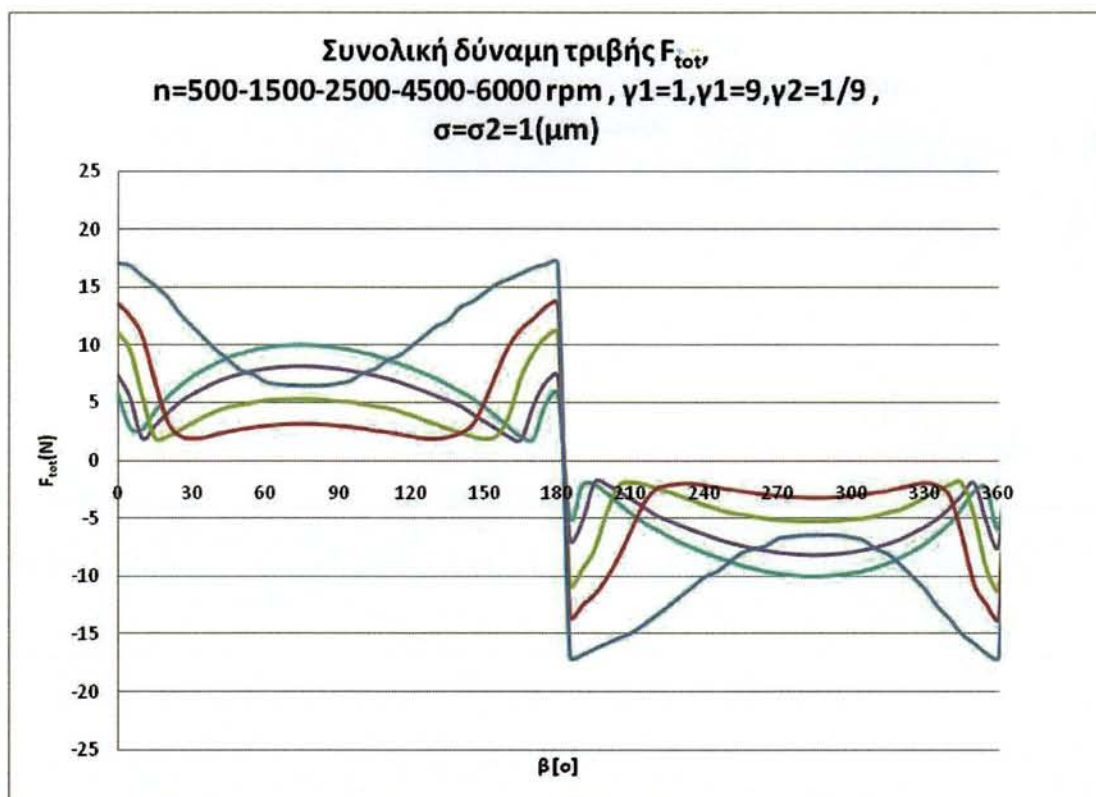
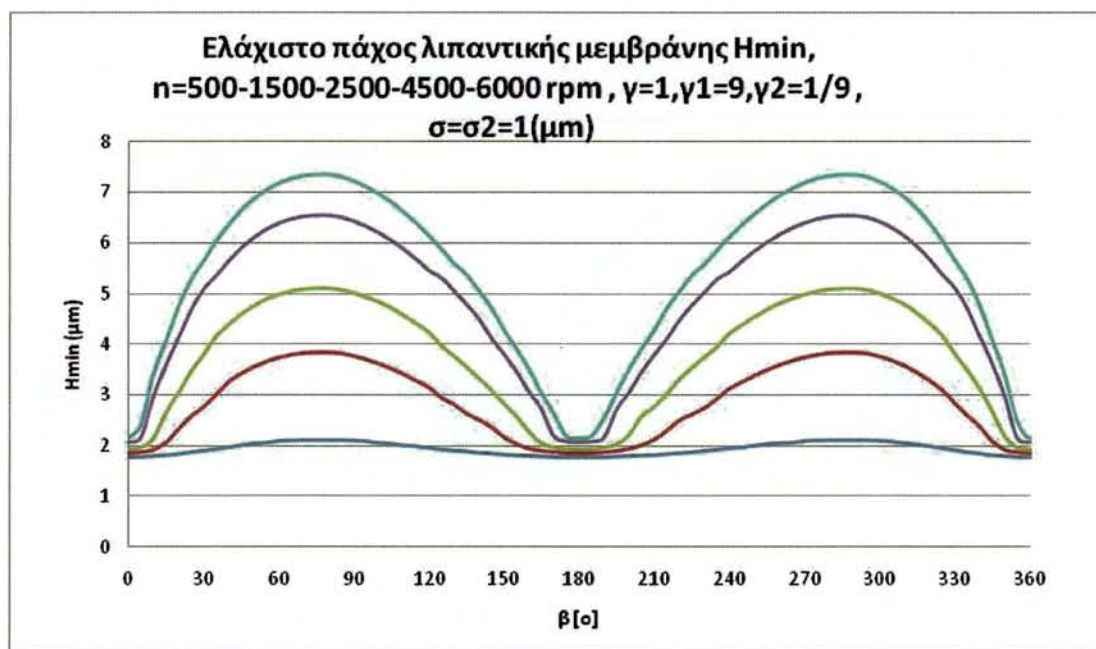
Σχήμα 3.2.49: Διάγραμμα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήση της γωνίας στροφαλοφόρου, $\gamma=\gamma_1=\gamma_2=9, \sigma_1=\sigma_2$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για μη φθαρμένη τραχεία επιφάνεια, στο σταθερό καθώς και στο κινούμενο κομμάτι των επιφανειών που έρχονται σε επαφή, στον πρώτο δακτύλιο. Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm, χρώματος κόκκινου: $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου: $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ: $n=4500$ rpm, χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm.



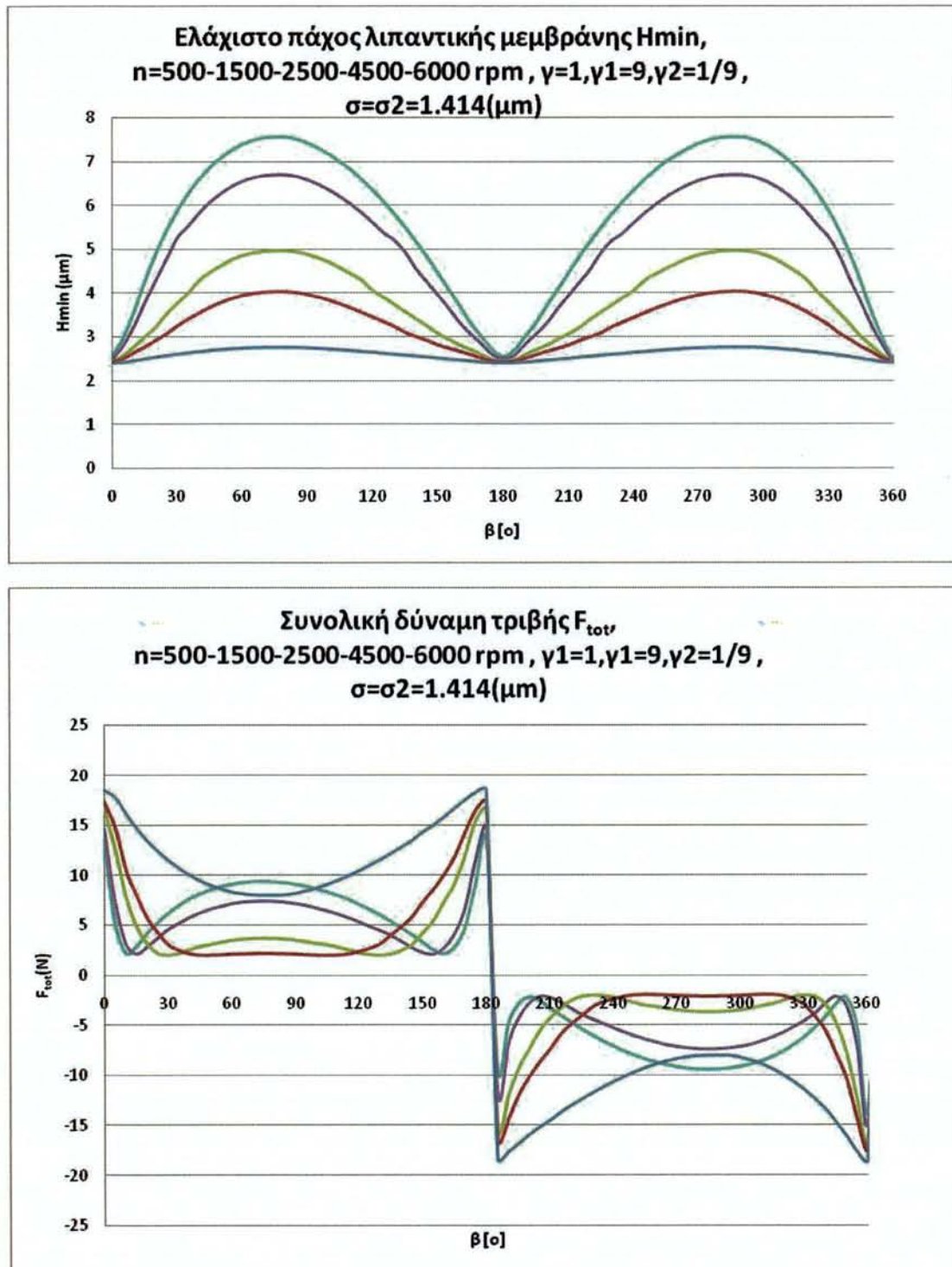
Σχήμα 3.2.50: Διάγραμμα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου, $\gamma=\gamma_1=\gamma_2=9, \sigma_1=\sigma_2$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για μη φθαρμένη τραχεία επιφάνεια, στο σταθερό καθώς και στο κινούμενο κομμάτι των επιφανειών που έρχονται σε επαφή, στον πρώτο δακτύλιο. Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm, χρώματος κόκκινου : $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου : $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ : $n=4500$ rpm, χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm.



Σχήμα 3.2.51: Διάγραμμα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήση της γωνίας στροφαλοφόρου $\gamma = \gamma_2 = 9, \sigma_1 = 0$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για μη φθαρμένη τραχεία επιφάνεια του πρώτου δακτυλίου. Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm, χρώματος κόκκινου: $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου: $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ: $n=4500$ rpm, χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm.



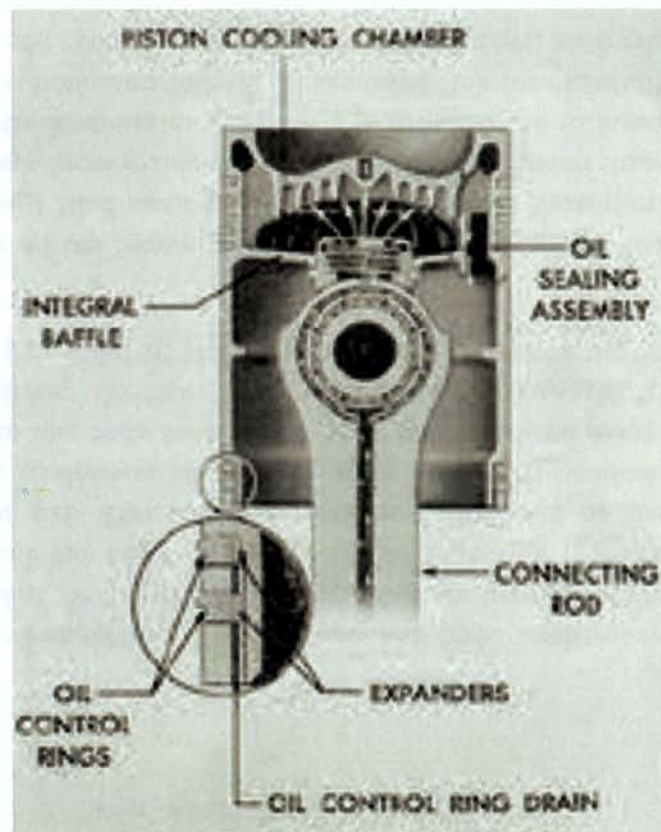
Σχήμα 3.2.52: Διάγραμμα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου $\gamma=\gamma_2=9, \sigma_1=0$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για μη φθαρμένη τραχεία επιφάνεια του πρώτου δακτυλίου. Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm, χρώματος κόκκινου: $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου: $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ: $n=4500$ rpm, χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm



Σχήμα 3.2.53: Διάγραμματα μεταβολής τιμών ελάχιστου πάχους λιπαντικής μεμβράνης καθώς και συνισταμένης δύναμης τριβής συναρτήση της γωνίας στροφαλοφόρου $\gamma = \gamma_2 = 9, \sigma_1 = 0$, $n=500-1500-2500-4500-6000$ rpm για μη φθαρμένη τραχεία επιφάνεια του πρώτου δακτυλίου. Καμπύλες : χρώματος ανοικτού μπλέ : $n=500$ rpm , χρώματος κόκκινου: $n=1500$ rpm, χρώματος πράσινου: $n=2500$ rpm, χρώματος μώβ: $n=4500$ rpm , χρώματος γαλάζιου : $n=6000$ rpm.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Συμπεράσματα-Προτάσεις Βελτίωσης-Προοπτικές

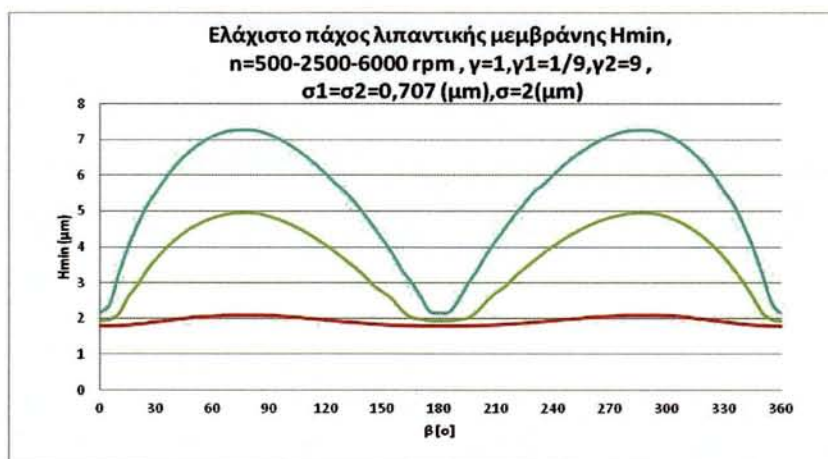


4.1 Συμπεράσματα

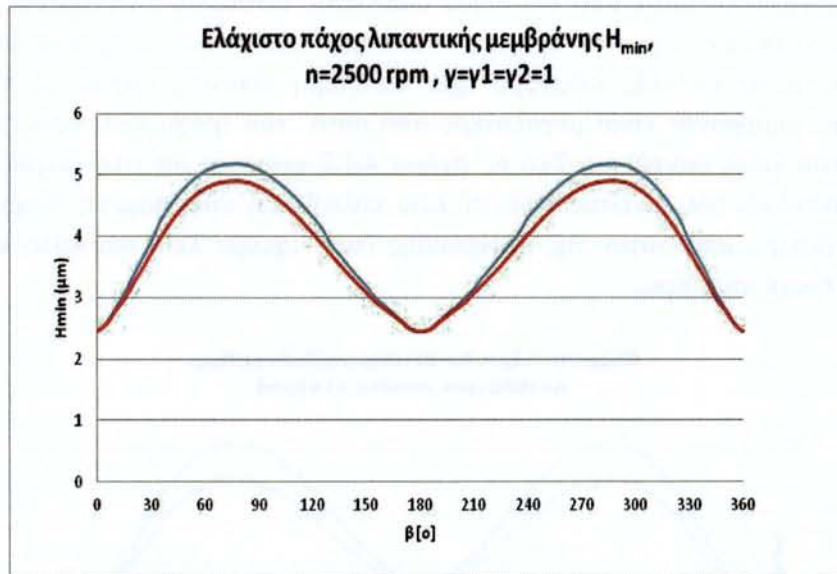
Τα βασικά συμπεράσματα που εξάγονται από την διπλωματική εργασία δίνονται στην συνέχεια και αφορούν αφενός μεν την χρήση και αποτελεσματικότητα του υπολογιστικού κώδικα oilfilm και αφετέρου χρησιμοποιώντας αυτόν σαν εργαλείο την επίδραση παραμέτρων που δεν έχουν αρκούντως μελετηθεί μέχρι σήμερα.

Έτσι σε ότι αφορά στην βελτίωση του κώδικα ο εμπλουτισμός του με υπό ρουτίνα που εισάγει γεωμετρία κατατομής δακτυλίου πληθώρας συνδυασμών μορφών (τριών περιοχών όπως φαίνεται στα σχήματα 4.2.1-4.2.24), συστηματική χρήση της οποίας δεν έγινε τελικά στην παρούσα διπλωματική εργασία που επικεντρώθηκε κυρίως στην διερεύνηση της επίδρασης των διορθωτικών συντελεστών ροής (flow factors) που σχετίζονται με της τραχύτητες των δύο επιφανειών καθώς και με την ανισοτροπία τους.

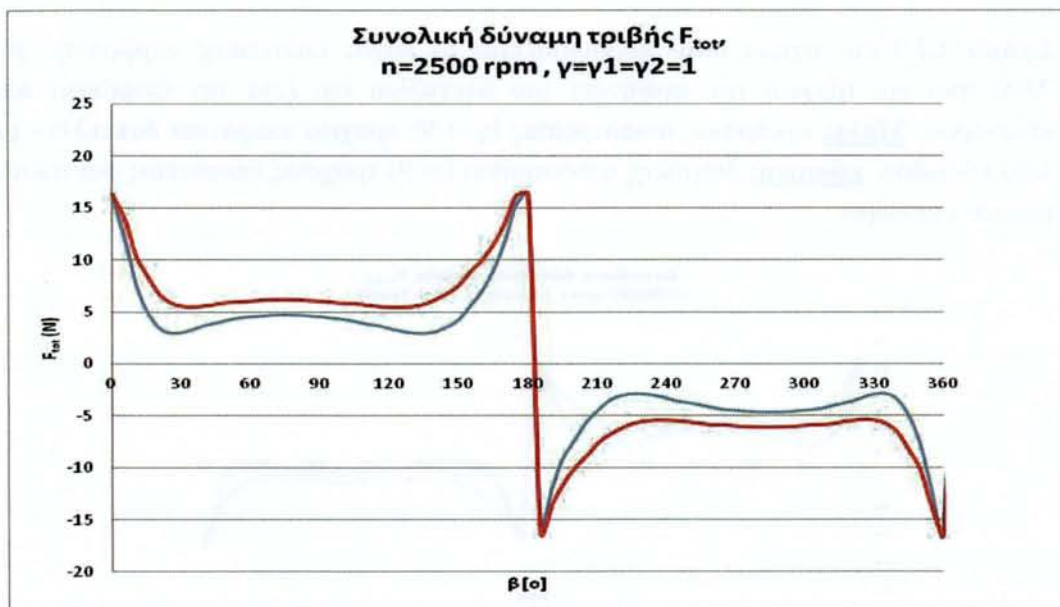
Χρησιμοποιώντας ένα πλέγμα διακριτοποίησης 21x21 με βήμα 13,816 mm ως προς την περιφερειακή κατεύθυνση και 0,0875 mm ως προς την διαμήκη κατεύθυνση. Θεωρήθηκε ότι έδινε ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς την ακρίβεια και την ταχύτητα υπολογισμού. Το πλέγμα αυτό οδήγησε σε κυλινδρικό πλέγμα κόμβων 11x11 άρα τελικά σε σύστημα εξισώσεων που προκύπτει από την επίλυση της εξίσωσης Reynolds 121 αγνώστων με 121 εξισώσεις. Κάτω από αυτές τις συνθήκες χρησιμοποιώντας την εξίσωση του Reynolds υπό την πλήρη της μορφή για τραχείες επιφάνειες, υπολογίστηκαν τιμές που φαίνονται σε αντιπροσωπευτικό διάγραμμα στην συνέχεια.



Σχήμα 4.1.2: Στο σχήμα αυτό παρουσιάζεται η σύγκριση του πάχους της λιπαντικής μεμβράνης για φθαρμένες τις επιφάνειες του κυλίνδρου καθώς και του χιτωνίου για τρεις διαφορετικές συχνότητες περιστροφής. **Κόκκινο:** 500 rpm, **πράσινο:** 2500 rpm, **γαλάζιο:** 6000 rpm.

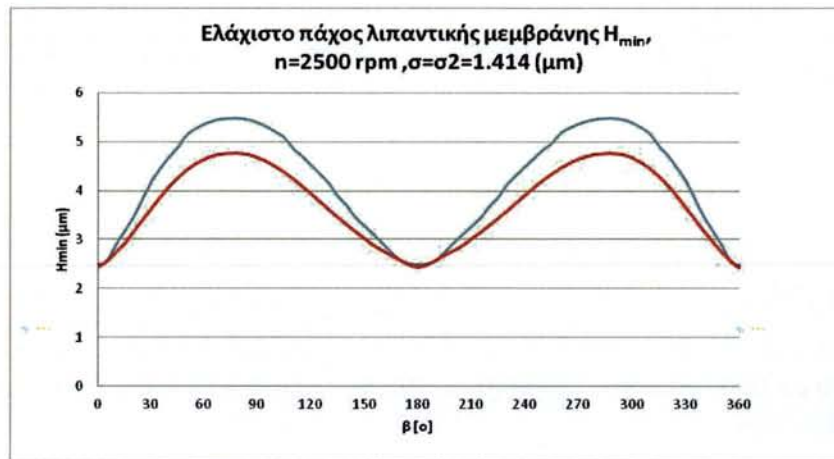


Σχήμα 4.1.1: στο σχήμα αυτό παρουσιάζεται το πάχος λιπαντικής μεμβράνης για 2500 rpm για ισότροπες τραχείες επιφάνειες. **Μπλέ:** ισότροπη τραχεία επιφάνεια δακτυλίου με λείο κύλινδρο, **κόκκινο:** ισότροπη τραχεία επιφάνεια κυλίνδρου με λείο δακτύλιο.

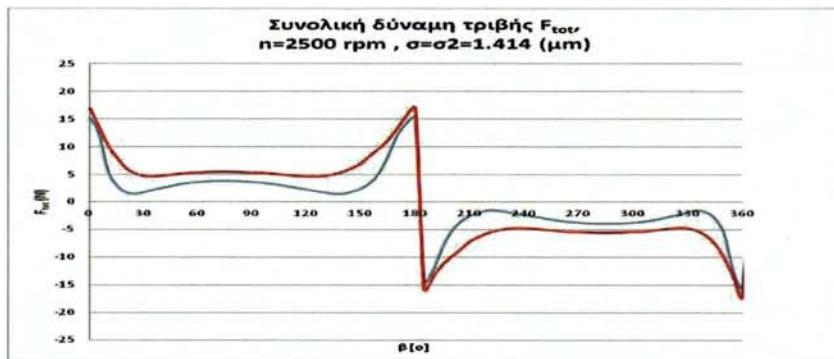


Σχήμα 4.1.2: στο σχήμα αυτό παρουσιάζεται η συνισταμένη δύναμη τριβής για 2500 rpm για ισότροπες τραχείες επιφάνειες. **Μπλέ:** ισότροπη τραχεία επιφάνεια δακτυλίου με λείο κύλινδρο, **κόκκινο:** ισότροπη τραχεία επιφάνεια κυλίνδρου με λείο δακτύλιο.

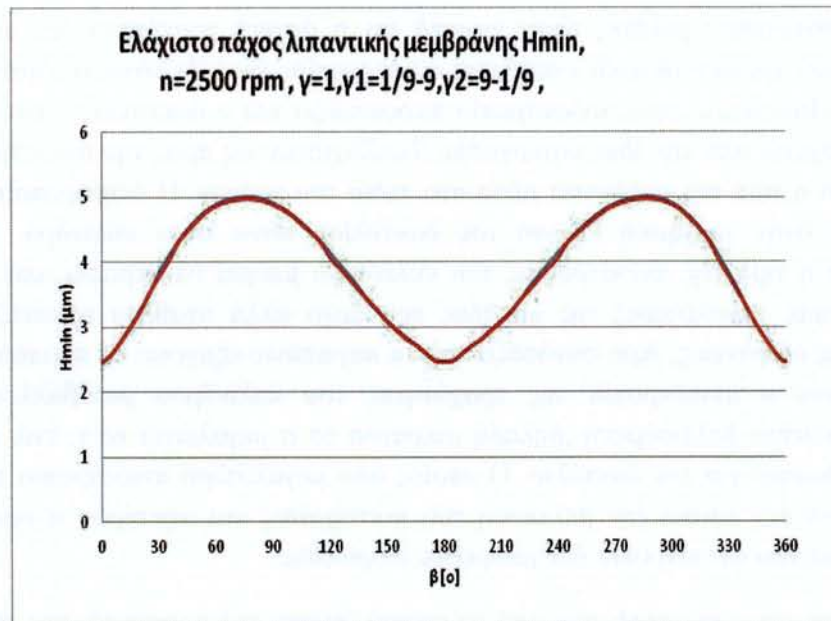
Αποδεικνύεται ότι ο τραχύς κινούμενος δακτύλιος πάνω σε λείο κύλινδρο δίνει καλύτερα αποτελέσματα από ότι λείος δακτύλιος κινούμενος σε τραχύ κύλινδρο. Κάτι τέτοιο διαφαίνεται στα σχήματα 4.1.1 και 4.1.2, όπου ο τραχύς κινούμενος δακτύλιος πάνω σε λείο κύλινδρο έχει καλύτερη λίπανση καθώς το πάχος της λιπαντικής μεμβράνης είναι μεγαλύτερο από αυτό του τραχύ κυλίνδρου που πάνω του κινείται λείος δακτύλιος. Στο δε σχήμα 4.1.2 φαίνεται ότι στην περίπτωση του τραχύ δακτυλίου που κινείται πάνω σε λείο κύλινδρο η συνισταμένη δύναμη τριβής είναι μικρότερη από αυτήν της περίπτωσης όπου έχουμε λείο δακτύλιο κινούμενο πάνω σε τραχύ κύλινδρο.



Σχήμα 4.1.3: στο σχήμα αυτό παρουσιάζεται το πάχος λιπαντικής μεμβράνης για 2500 rpm για τραχεία την επιφάνεια του δακτυλίου και λεία την επιφάνεια του κυλίνδρου. **Μπλε:** εγκάρσιας ανισοτροπίας ($\gamma=1/9$) τραχεία επιφάνεια δακτυλίου με λείο κύλινδρο, **κόκκινο:** διαμήκης ανισοτροπία ($\gamma=9$) τραχείας επιφάνειας δακτυλίου με λείο κύλινδρο.

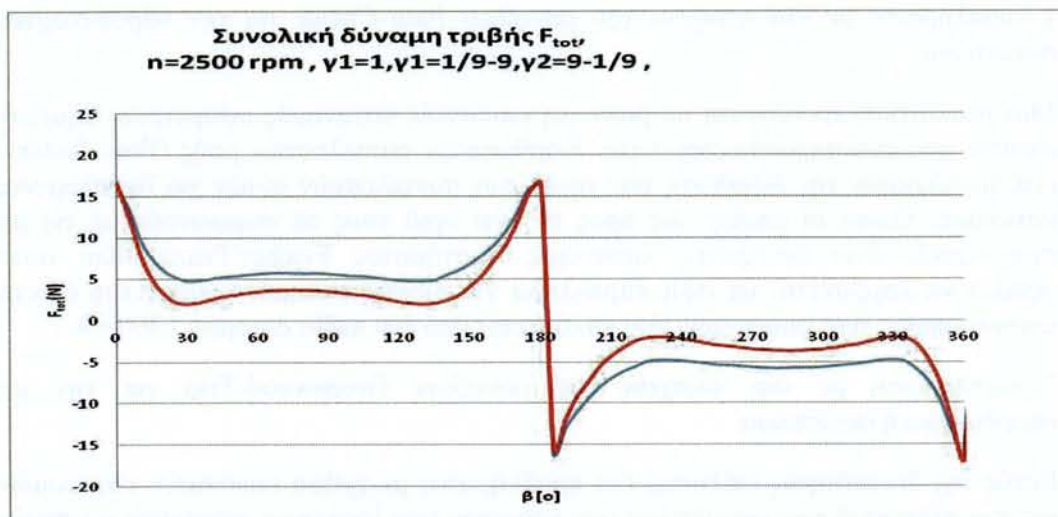


Σχήμα 4.1.4: στο σχήμα αυτό παρουσιάζεται η συνισταμένη δύναμη τριβής για 2500 rpm καθώς και για τραχεία την επιφάνεια του δακτυλίου και λεία την επιφάνεια του κυλίνδρου. **Μπλε:** εγκάρσιας ανισοτροπίας ($\gamma=1/9$) τραχεία επιφάνεια δακτυλίου με λείο κύλινδρο, **κόκκινο:** διαμήκης ανισοτροπία ($\gamma=9$) τραχείας επιφάνειας δακτυλίου με λείο κύλινδρο.



Σχήμα 4.1.5: στο σχήμα αυτό παρουσιάζεται το πάχος λιπαντικής μεμβράνης για 2500 rpm για τραχείες και τις δύο επιφάνειες και του δακτυλίου και του κυλίνδρου.

Μπλε: εγκάρσια ανισοτροπίας ($\gamma=1/9$) τραχεία επιφάνεια κυλίνδρου και διαμήκης ανισοτροπίας ($\gamma=9$) τραχεία επιφάνεια δακτυλίου, **κόκκινο:** εγκάρσια ανισοτροπίας ($\gamma=1/9$) τραχεία επιφάνεια δακτυλίου και διαμήκης ανισοτροπίας ($\gamma=9$) τραχεία επιφάνεια κυλίνδρου.



Σχήμα 4.1.6: στο σχήμα αυτό παρουσιάζεται το πάχος λιπαντικής μεμβράνης για 2500 rpm για τραχείες και τις δύο επιφάνειες και του δακτυλίου και του κυλίνδρου.

Μπλε: εγκάρσια ανισοτροπίας ($\gamma=1/9$) τραχεία επιφάνεια κυλίνδρου και διαμήκης ανισοτροπίας ($\gamma=9$) τραχεία επιφάνεια δακτυλίου, **κόκκινο:** εγκάρσια ανισοτροπίας ($\gamma=1/9$) τραχεία επιφάνεια δακτυλίου και διαμήκης ανισοτροπίας ($\gamma=9$) τραχεία επιφάνεια κυλίνδρου.

Από προηγούμενες μελέτες είναι γνωστό ότι η αρχική τραχύτητα του κυλίνδρου παρουσιάζει χαρακτηριστικά εγκάρσιας ανισοτροπίας ($\gamma=1/3$) λόγω της κατεργασίας hoaning. Παρόμοιας τιμής ανισοτροπία παρουσιάζει και ο δακτύλιος ο οποίος όμως δεν προέρχεται από την ίδια κατεργασία. Τουλάχιστον ως προς την ανισοτροπία του κυλίνδρου η τιμή της αυξάνεται μέσα στο πεδίο του χρόνου. Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται στην γραμμική κίνηση του δακτυλίου πάνω στον κύλινδρο. Κατά το στρώσιμο η τιμή της ανισοτροπίας του κυλίνδρου μπορεί να περάσει από την τιμή $\gamma=1$ σε τιμές μεγαλύτερες της μονάδας που αργά αλλά σταθερά εμφανίζονται σε φθαρμένες επιφάνειες. Άρα συνδυάζοντας τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα ότι τουλάχιστον η ανισοτροπία της τραχύτητας του κυλίνδρου μεταβάλλεται στην πραγματικότητα βελτιούμενη, δηλαδή μικραίνει το σ μεγαλώνει το γ , ενώ αυτό δεν είναι επιθυμητό για τον δακτύλιο. Ο οποίος όσο μεγαλύτερη ανισοτροπία έχει τόσο αφενός μεν δεν ευνοεί την βελτίωση του συστήματος και αφετέρου η ευνοϊκή για αυτόν εγκάρσια ανισοτροπία δεν μπορεί να διορθωθεί.

Άρα τελικά όπως συμπεράναμε από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης επιθυμητό είναι ο δακτύλιος να διατηρεί τραχύτητα εγκάρσιας κατεύθυνσης σταθερή μέσα στο χρόνο. Ενώ παράλληλα ο κύλινδρος να μειώνει την τραχύτητα του μέχρι τα ελάχιστα αποδεκτά επίπεδα κάτω από τα οποία δεν θα υπάρχει συνάφεια με το λάδι.

4.2 Προτάσεις Βελτίωσης

1-συμπλήρωση με νέα στοιχεία του μοντέλου Patir-Cheng για την υδροδυναμική συνιστώσα

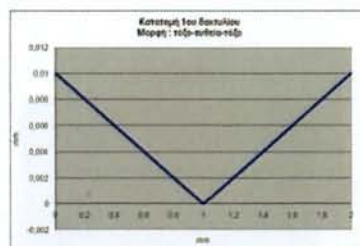
Μια ρεαλιστική προσέγγιση με βάση μη κανονικές κατανομές υψομέτρων σημείων απαιτεί είτε επαναπροσδιορισμό των διορθωτικών συντελεστών ροής (flow factors) είτε τουλάχιστον την διόρθωση των τιμών των συντελεστών αυτών για διορθωμένες κατανομές Gauss οι οποίες ως προς το άνω όριό τους να συμφωνούν με τις μη συμμετρικές άνω φραγμένες κατανομές συστήματος Fischer-Pearson. Και αυτό οφείλει να λαμβάνεται υπ όψη παράλληλα για διαφοροποιημένες τιμές του δείκτη ανισοτροπίας των επιφανειών που καλύπτεται από ένα πεδίο ορισμού $1/9 < \gamma < 9$.

2-συμπλήρωση με νέα στοιχεία του μοντέλου Greenwood-Trip για την μη υδροδυναμική συνιστώσα

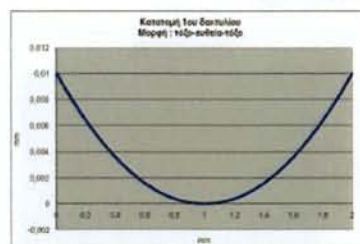
Εκτός της δυνατότητας επίλυσης του προβλήματος με χρήση κανονικών κατανομών για τον πληθυσμό των υψομέτρων των κορυφών των λοφίσκων απαιτείται η ύπαρξη δυνατότητας επίλυσης με την χρήση ασύμμετρων και άνω φραγμένων κατανομών του συστήματος Fischer Pearson ή τουλάχιστον όπως και στο προηγούμενο μοντέλο (Patir-Cheng) η διαφοροποίηση των χαρακτηριστικών τιμών των κατανομών αυτών ώστε να προσεγγίζουν κατά το άνω όριό τους τις κατανομές Fischer-Pearson. Σε αντίθετη περίπτωση είτε για την υδροδυναμική συνιστώσα της τριβής είτε για την μη υδροδυναμική θα υπερεκτιμάτε ο ρόλος της τραχύτητας εμφανίζοντας ουσιαστικά επαφές εκεί που δεν υπάρχουν. Δηλαδή ενώ ο διαχωρισμός των δύο

φθαρμένων επιφανειών υλοποιείται με πάχος λιπαντικής μεμβράνης σημαντικής τιμής και δεν υπάρχει ενδεχόμενο επαφών μεταξύ των τραχειών επιφανειών με την χρήση μη διορθωμένων κανονικών κατανομών η θεωρητική προσομοίωση θα έδινε αποτέλεσμα με σημαντικό αριθμό επαφών και κατά συνέπεια σημαντικό ποσοστό του φορτίου επαφής να υποβαστάζεται από παραμορφωμένους λοφίσκους οι οποίοι είναι ανύπαρκτοι στην πραγματικότητα.

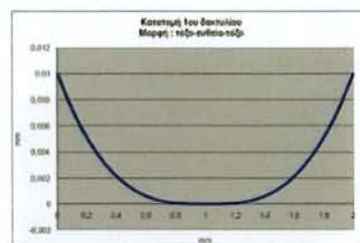
3-συμπλήρωση με νέα στοιχεία των γεωμετρικών χαρακτηριστικών ,μετάβαση από την κυλινδρική συμμετρία σε μια γενική μορφή μη συμμετρικής γεωμετρίας. Τέτοια παραδείγματα για νέα γεωμετρικά στοιχεία δίδονται στα σχήματα που ακολουθούν.



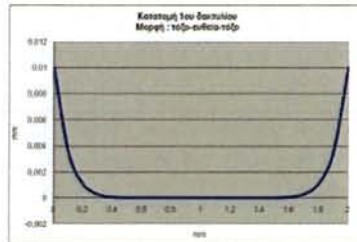
Σχήμα 4.2.1:Κατατομή προερχόμενη από τον τύπο τόξο-ευθεία-τόξο.Χρησιμοποιείται για τον 1^ο δακτύλιο , συμμετρική ,μηδενικού μήκους ευθεία , τόξο πρώτου βαθμού (γραμμικό).



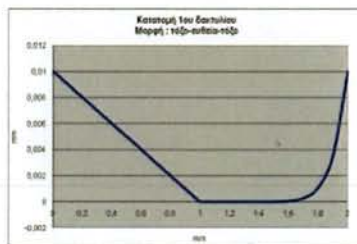
Σχήμα 4.2.2:Κατατομή προερχόμενη από τον τύπο τόξο-ευθεία-τόξο.Χρησιμοποιείται για τον 1^ο δακτύλιο , συμμετρική ,μηδενικού μήκους ευθεία, τόξο δευτέρου βαθμού.



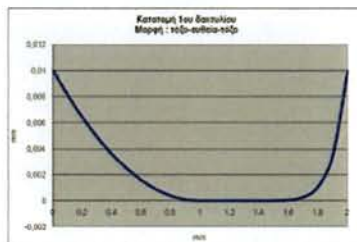
Σχήμα 4.2.3:Κατατομή προερχόμενη από τον τύπο τόξο-ευθεία-τόξο.Χρησιμοποιείται για τον 1^ο δακτύλιο , συμμετρική ,μηδενικού μήκους ευθεία, τόξο τρίτου βαθμού.



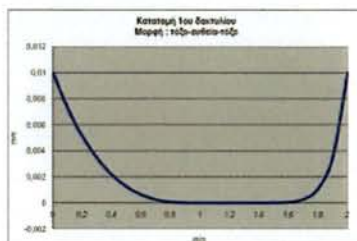
Σχήμα 4.2.4:Κατατομή προερχόμενη από τον τύπο τόξο-ευθεία-τόξο.Χρησιμοποιείται για τον 1^ο δακτύλιο , συμμετρική ,μηδενικού μήκους ευθεία, τόξο δέκατου βαθμού.



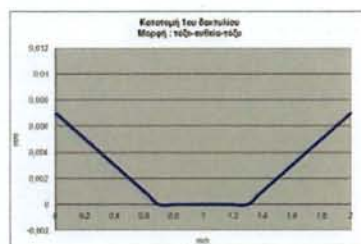
Σχήμα 4.2.5:Κατατομή προερχόμενη από τον τύπο τόξο-ευθεία-τόξο.Χρησιμοποιείται για τον 1^ο δακτύλιο , σε κατάσταση φθοράς μη συμμετρική , μηδενικού μήκους ευθεία, τόξο πρώτου και δεκάτου βαθμού αντίστοιχα.



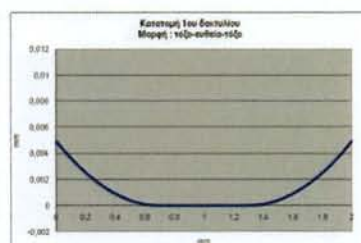
Σχήμα 4.2.6:Κατατομή προερχόμενη από τον τύπο τόξο-ευθεία-τόξο.Χρησιμοποιείται για τον 1^ο δακτύλιο , σε κατάσταση φθοράς μη συμμετρική , μηδενικού μήκους ευθεία, τόξο δευτέρου και δεκάτου βαθμού αντίστοιχα.



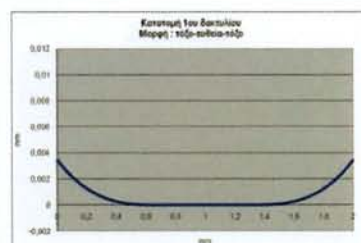
Σχήμα 4.2.7:Κατατομή προερχόμενη από τον τύπο τόξο-ευθεία-τόξο.Χρησιμοποιείται για τον 1^ο δακτύλιο , σε κατάσταση φθοράς μη συμμετρική ,μη μηδενικού μήκους ευθεία, τόξο τρίτου και δεκάτου βαθμού αντίστοιχα.



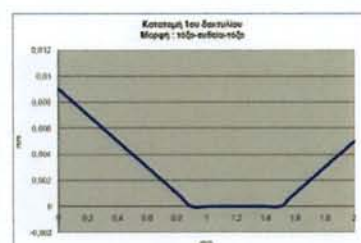
Σχήμα 4.2.8:Κατατομή προερχόμενη από τον τύπο τόξο-ευθεία-τόξο.Χρησιμοποιείται για τον 1^ο δακτύλιο , σε κατάσταση φθοράς ,συμμετρική ,μη μηδενικού μήκους ευθεία, τόξο πρώτου και πρώτου βαθμού αντίστοιχα.



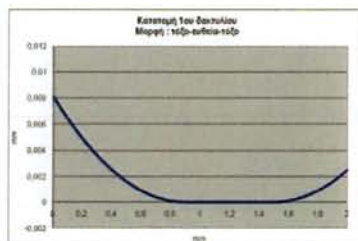
Σχήμα 4.2.9:Κατατομή προερχόμενη από τον τύπο τόξο-ευθεία-τόξο.Χρησιμοποιείται για τον 1^ο δακτύλιο , σε κατάσταση φθοράς ,συμμετρική ,μη μηδενικού μήκους ευθεία, τόξο δευτέρου και δευτέρου βαθμού αντίστοιχα.



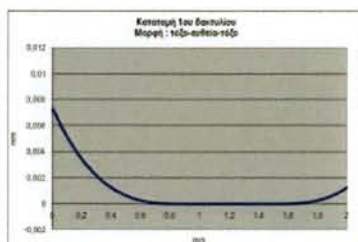
Σχήμα 4.2.10:Κατατομή προερχόμενη από τον τύπο τόξο-ευθεία-τόξο.Χρησιμοποιείται για τον 1^ο δακτύλιο , σε κατάσταση φθοράς ,συμμετρική ,μη μηδενικού μήκους ευθεία, τόξο τρίτου και τρίτου βαθμού αντίστοιχα.



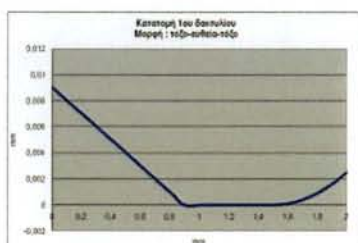
Σχήμα 4.2.11:Κατατομή προερχόμενη από τον τύπο τόξο-ευθεία-τόξο.Χρησιμοποιείται για τον 1^ο δακτύλιο , σε κατάσταση φθοράς ,μη συμμετρική ,μη μηδενικού μήκους ευθεία, τόξο πρώτου και πρώτου βαθμού αντίστοιχα.



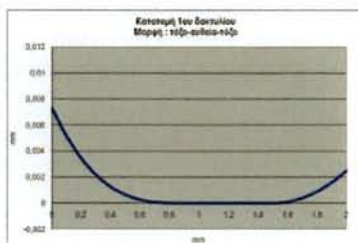
Σχήμα 4.2.12:Κατατομή προερχόμενη από τον τύπο τόξο-ευθεία-τόξο.Χρησιμοποιείται για τον 1^ο δακτύλιο , σε κατάσταση φθοράς ,μη συμμετρική ,μη μηδενικού μήκους ευθεία, τόξο δευτέρου και δευτέρου βαθμού αντίστοιχα.



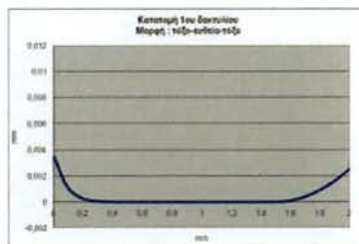
Σχήμα 4.2.13:Κατατομή προερχόμενη από τον τύπο τόξο-ευθεία-τόξο.Χρησιμοποιείται για τον 1^ο δακτύλιο , σε κατάσταση φθοράς ,μη συμμετρική ,μη μηδενικού μήκους ευθεία, τόξο τρίτου και τρίτου βαθμού αντίστοιχα.



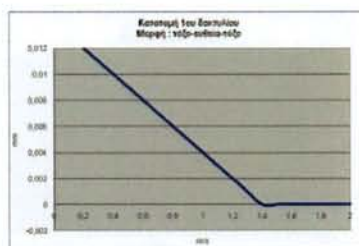
Σχήμα 4.2.14:Κατατομή προερχόμενη από τον τύπο τόξο-ευθεία-τόξο.Χρησιμοποιείται για τον 1^ο δακτύλιο , σε κατάσταση φθοράς ,μη συμμετρική ,μη μηδενικού μήκους ευθεία, τόξο πρώτου και δευτέρου βαθμού αντίστοιχα.



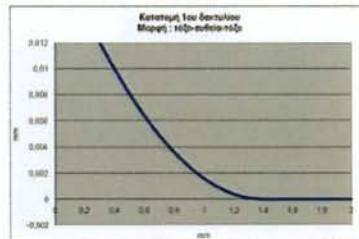
Σχήμα 4.2.15:Κατατομή προερχόμενη από τον τύπο τόξο-ευθεία-τόξο.Χρησιμοποιείται για τον 1^ο δακτύλιο , σε κατάσταση φθοράς ,μη συμμετρική ,μη μηδενικού μήκους ευθεία, τόξο πρώτου και δευτέρου βαθμού αντίστοιχα.



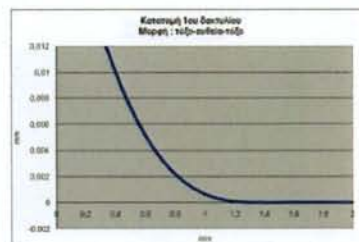
Σχήμα 4.2.16:Κατατομή προερχόμενη από τον τύπο τόξο-ευθεία-τόξο.Χρησιμοποιείται για τον 1^ο δακτύλιο , σε κατάσταση φθοράς ,μη συμμετρική ,μη μηδενικού μήκους ευθεία, τόξο πρώτου και δευτέρου βαθμού αντίστοιχα



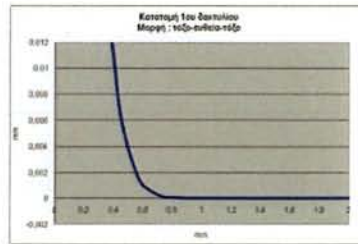
Σχήμα 4.2.17:Κατατομή προερχόμενη από τον τύπο τόξο-ευθεία-τόξο.Χρησιμοποιείται για τον 2^ο και 3^ο δακτύλιο , σε κατάσταση φθοράς ,μη συμμετρική ,μη μηδενικού μήκους ευθεία, τόξο πρώτου και μηδενικό μήκος δευτέρου τόξου.



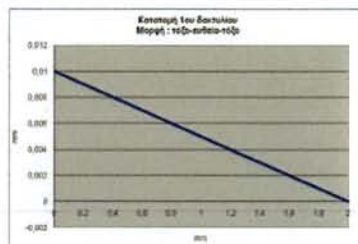
Σχήμα 4.2.18:Κατατομή προερχόμενη από τον τύπο τόξο-ευθεία-τόξο.Χρησιμοποιείται για τον 2^ο και 3^ο δακτύλιο , σε κατάσταση φθοράς ,μη συμμετρική ,μη μηδενικού μήκους ευθεία, τόξο δευτέρου και μηδενικό μήκος δευτέρου τόξου.



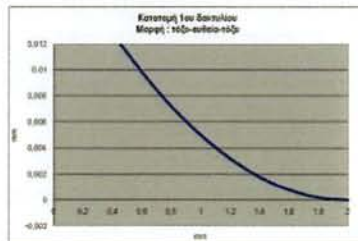
Σχήμα 4.2.19:Κατατομή προερχόμενη από τον τύπο τόξο-ευθεία-τόξο.Χρησιμοποιείται για τον 2^ο και 3^ο δακτύλιο , σε κατάσταση φθοράς ,μη συμμετρική ,μη μηδενικού μήκους ευθεία, τόξο τρίτου και μηδενικό μήκος δευτέρου τόξου



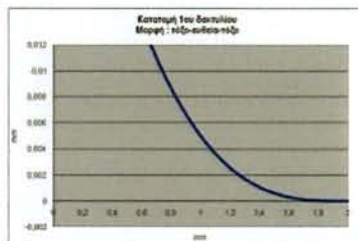
Σχήμα 4.2.20:Κατατομή προερχόμενη από τον τύπο τόξο-ευθεία-τόξο.Χρησιμοποιείται για τον 2^ο και 3^ο δακτύλιο , σε κατάσταση φθοράς ,μη συμμετρική ,μη μηδενικού μήκους ευθεία, τόξο δέκατου και μηδενικό μήκος δευτέρου τόξου



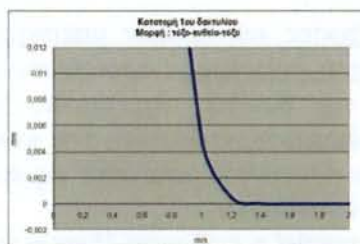
Σχήμα 4.2.21:Κατατομή προερχόμενη από τον τύπο τόξο-ευθεία-τόξο.Χρησιμοποιείται για τον 2^ο και 3^ο δακτύλιο , σε κατάσταση φθοράς ,μη συμμετρική , μηδενικού μήκους ευθεία, τόξο πρώτου και μηδενικό μήκος δευτέρου τόξου



Σχήμα 4.2.22:Κατατομή προερχόμενη από τον τύπο τόξο-ευθεία-τόξο.Χρησιμοποιείται για τον 2^ο και 3^ο δακτύλιο , σε κατάσταση φθοράς ,μη συμμετρική , μηδενικού μήκους ευθεία, τόξο δευτέρου και μηδενικό μήκος δευτέρου τόξου



Σχήμα 4.2.23:Κατατομή προερχόμενη από τον τύπο τόξο-ευθεία-τόξο.Χρησιμοποιείται για τον 2^ο και 3^ο δακτύλιο , σε κατάσταση φθοράς ,μη συμμετρική , μηδενικού μήκους ευθεία, τόξο τρίτου και μηδενικό μήκος δευτέρου τόξου



Σχήμα 4.2.24: Κατατομή προερχόμενη από τον τύπο τόξο-ευθεία-τόξο. Χρησιμοποιείται για τον 2^ο και 3^ο δακτύλιο, σε κατάσταση φθοράς, μη συμμετρική, μηδενικού μήκους ευθεία, τόξο δέκατου και μηδενικό μήκος δευτέρου τόξου.

Πλέον με τις δυνατότητες που απέκτησε ο κώδικας με τον διαχωρισμό του σε υπό ρουτίνες είναι δυνατό και θεμιτό να γίνει η συνέχεια της βελτίωσης του εισάγοντας όλες τις κατατομές των δακτυλίων οι οποίες είναι άφθονες και σίγουρα θα παρουσιάσουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον ως προς την προσομοίωση της λίπανσης των δύο επιφανειών σε επαφή.

4.3 Προοπτικές

Μετά την παρουσίαση των συμπερασμάτων τα οποία εξάγονται από την παρούσα διπλωματική εργασία καθίσταται εμφανής η ανάγκη συνέχισης της συγκεκριμένης εργασίας στην ίδια κατεύθυνση δηλαδή στην λεπτομερή βελτίωση του υπολογιστικού κώδικα oilfilm κυρίως λαμβάνοντας υπόψη τα παρακάτω στοιχεία:

- 1) Υπαρξη διακένου δακτυλίου: ο δακτύλιος του εμβόλου θα πρέπει να μελετηθεί στο μέλλον σαν ένα έντονα παραμορφώσιμο ελαστικό στοιχείο το οποίο εμφανίζει μεταβλητή διάμετρο κατά την διάρκεια του κύκλου της μηχανής με την παράλληλη αυξομείωση του διακένου (gap) που κλονίζει και την κυλινδρικού τύπου συμμετρία. Προτείνεται η χρήση υπολογιστικού κώδικα με βάση τα πεπερασμένα στοιχεία ο οποίος θα υπολογίζει για τα πεδία υδροδυναμικών πιέσεων και λοιπών μη υδροδυναμικών δυνάμεων την παραμόρφωση του δακτυλίου συναρτήσει της γωνίας στροφαλοφόρου άξονα. Η νέα υπολογισθείσα γεωμετρία του δακτυλίου θα επανεισάγεται στην εξίσωση του Reynolds με σκοπό την εύρεση και πάλι της ισορροπίας του δακτυλίου με τα νέα του χαρακτηριστικά. Μέχρι τώρα ο δακτύλιος είχε θεωρηθεί σαν στοιχείο σταθερής διαμέτρου για τον υπολογισμό του πλέγματος διακριτοποίησης του χωρίς διάκενο που όμως ακολουθούσε ως προς το πάχος της λιπαντικής μεμβράνης μια ελαφρά παραμόρφωση ως προς την διάμετρο η οποία είχε θεωρηθεί αμελητέα. Το διάκενο είναι γνωστό ότι δημιουργεί αφενός μεν κατά την κίνηση του δακτυλίου υπό πλήρες φορτίο, φάσεις συμπίεσης εκτόνωσης, μία εκκεντρότητα με τάση την μείωση της λιπαντικής μεμβράνης στο αντί διαμετρικό του σημείο ενώ σε κατάσταση λειτουργίας χωρίς πίεση κυλίνδρου που περιγράφει και τις φάσεις εξαγωγής εισαγωγής η υδροδυναμική δράση στην αντί διαμετρική του περιοχή και η αντίστοιχη έλλειψη υδροδυναμικής πίεσης στο διάκενο δημιουργούν συνθήκες ελαχιστοποίησης της λιπαντικής μεμβράνης στην περιοχή του διακένου και ιδιαίτερα στα δύο του άκρα.

- 2) Επίδραση της κυμάτωσης και λοιπών μακρογεωμετρικών σφαλμάτων του συστήματος κυρίως του κυλίνδρου : προτείνεται ο εμπλουτισμός του κώδικα με υπορουτίνα με την βοήθεια της οποίας θα εισάγεται στο σύστημα περιφερειακή ή και διαμήκης κυμάτωση του κυλίνδρου που υφίσταται στην πράξη και δεν έχουν αρκούντως μελετηθεί ως προς την επίδρασή τους στην τριβή και φθορά του συστήματος.
- 3) Προτείνεται να διερευνηθεί η επίδραση όλων των δυνάμεων που εξασκούνται πάνω στον δακτύλιο όπως δυνάμεις τριβής μεταξύ δακτυλίου και εμβόλου και λοιπές αδρανειακές δυνάμεις.
- 4) Να μελετηθεί μοντέλο το οποίο θα περιγράφει την λίπανση των δακτυλίων μέσα στο συνολικό τριβοσύστημα τους δηλαδή να προσεγγίζει την ποσότητα λιπαντικού μέσου που αφήνει ο προηγούμενος δακτύλιος στον επόμενο του για επαρκή ή και μερική λίπανση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. CHRISTENSEN, H., "Stochastic Models for Hydrodynamic Lubrication of Rough Surfaces", Proc. Inst. Mech. Engrs Tribology Group 184, Part 1, Vol.55. p. 1013, 1970.
2. CHRISTENSEN, H., "A Theory of Mixed Lubrication", Proc. 1 Mech. Engrs, Vol. 186, p. 421. 1972.
3. DAS, K.P., "Analysis of Piston Ring Lubrication", SAE Paper 750008, 1976.
4. ELROD, H.D., "Thin-Film Lubrication Theory for Newtonian, Fluids With Surfaces Processing Striated Roughness or Grooving", Transaction of the ASME, pp. 484-489, October 1973.
5. ELROD, H.D., ANWAR, J. COLSHER, R., "Transient Lubricating Films with Inertia", Journal of Lubrication Technology, Vol. 105, pp. 369-374, July 1983.
6. FURUHAMA, S., and HIRUMA, M. "Axial Movement of Piston Rings in the Groove", ASLE Transactions, Vol. 15,4, pp. 278-287, 1972
7. FURUHAMA, S.I., TAKIGUCHI, T., "Measurement of Piston Force in Actual Operating Diesel Engine", SAE Paper September 10-13, 1979.
8. FURUHAMA, S., TAKIGUCHI, T., TOMIZAWA, K., "Effect of piston ring Designs on the Piston Friction Forces in Diesel Engines", Mushashi Institute of Technology, Tokyo, 1980.
9. FURUHAMA, S., HIRUMA, M. TOMIZAWA, K., "An Increase of engine Oil Consumption at High Temperatures of Piston and Cylinder", Mushashi Institute of technology, Tokyo, 1980.
10. GREENWOOD, J.A., "Constriction resistance and the Real Area of Contact", BRIT J. APP. PHYS. Vol 17, pp. 1621-1632, 1966.
11. GREENWOOD, J.A., and WILLIAMSON, J.B.P., "Contact of Nominally Flat Surfaces", Proc. Roy Soc Lond, A. 295, pp. 300-319, 1966.
12. GREENWOOD, J.A., "The Area of contact Between Rough Surfaces and Flats", Journal of Lubrication technology, pp. 81-91, January 1967.
13. GREENWOOD, J.A., and TRIPP, J.H., "The Contact of two Nominally Flat Surfaces", Proc. Inst. Of Mech. Eng., Vol. 185; p. 625, 1971.

14. HIRUMA, M., FURUHAMA, S., MOSCHIZUKI, N., "Tribology of piston-Rod Seal Under high Temperature and Oilness condition", Lubrication Engineering, February 1982.
15. MOORE, S.L and HAMMILTON, G.M. "The Piston Ring at top Dead Center", Tribology Group, Proc. Inst. Engrs, Vol. 194, pp. 373-381, 1980.
16. MOORE, S.L., "Measurement of the Ring to Liner Oil Film Thickness in a Caterpillar 1-G Diesel Engine", SAE paper 790730, 1980.
17. MOORE, S.L., "Piston Ring Lubrication in a Two-stroke Diesel engine", Wear, 72, pp. 353-369, 1981.
18. PANDAZARAS, C., "Diminution des Pertes par Frottement dans les ensembles Pistons-Segments-Chemises", Rapport de stage de Fin d'études, ISMCM, 1981.
19. PANDAZARAS, C., "Etudes Experimentales et Theoriques sur les Pertes par Frottement dans les Ensembles Pistons-Segments-Chemises" DLA/RNUR, 1982.
20. PANDAZARAS C., "Modelisation du Frottement Segment-Chemise" DLA.RNUR, Note Technique no 5781, 1982.
21. PANDAZARAS, C., "Influence de la Forme des Segments sur le Frottement Segment-Chemise", PLA/RNUR, Note technique No 5808, 1983.
22. PATIR, N., and CHENG, H.S., "An Average Model for Determining Effects of Tree Dimensional Roughness on Patrial Hydrodynamic Lubrication", Transaction of the ASME, Vol. 100, January 1978.
23. PATIR, N., and CHENG H.S., "Aplication of average Flow Model to Lubriacation Between Rough Sliding Surfaces", Transaction of the ASME, 220/Vol 101, April 1979.
24. PEKLENIK, J., "Properties and Metrology of surfaces" Oxford Inst. 4th, Paper 24, April 1968.
25. ROHDE, S.M., "A Mixed Friction Model for Dynamically Loaded Contacts with Application to Piston Ring lubrication", GENERAL MOTORS Research Laboratories, 1980.
26. ROHDE, S.M., WHITAKER, K., and mc ALLISTER, G.T., "A Study of the Effects of Piston Ring and Engine Design Variables on Piston Ring Friction, To Appear in Frontiers in Research and Design, ASME, 1979.
27. "Statistique Appliquee e l' Exploitation des mesures "Tomes 1 et 2, Commissariat e l' energie Atomique, MASSON 1978.

28. TRIPP, J.H., "Surface Roughness Effects in hydrodynamic Lubrication: The Flow Factor Method", Transactions of the ASME, Vol. 105, pp. 458-465, July 1983.
29. Pandazaras, C.N., «Diminution des pertes par frottement dans les ensembles Pistons-Segments- Chemises / Simulateur: Definition-Mesures proposées- Calcul Théorique de l' Effort de Frottement", Institut Supérieur des Matériaux et de la Construction Mécanique - ISMCM, St Ouen/Paris- France, Thesis D.I.S – D.E.A. (1981)
30. Pandazaras, C.N., «Modelisation Théorique et Expérimentale du Frottement Segment-Chemise», Thesis D.D.I., ISMCM - DLA/DRDA/RNUR, France (1985)
31. Pandazaras, C.N., «RENAULT Ring-Liner Friction Code», Report JRC-PG Tribology in Power Train, (PSA-FIAT-VOLVO-B.L.-RENAULT) DLA/DRDA/RNUR, France (1985)
32. Rohde S.M., «A mixed friction model for dynamically loaded contacts with application to piston ring lubrication», Rohde and Cheng, *Surface Roughness Effects in Hydrodynamic and Mixed Lubrication ASME* (1980), pp. 19-50
33. Patir N. and Cheng H.S., «An average flow model for determining effects of three-dimensional roughness in partial hydrodynamic lubrication», *Journal of Lubrication Technology, Trans. ASME* 100 1 (1978) pp. 12-17
34. Patir N. and Cheng H.S., «Application of average flow model to lubrication between rough sliding surfaces», *Journal of Lubrication Technology, Trans. ASME* 101 2 (1979) pp. 220-230
35. Greenwood J.A. and Tripp J.H., «The contact of two nominally flat surfaces», *Proc. Inst. Mech. Eng.* 185 (1971), pp. 625-633
36. Priest M., «The Wear and Lubrication of Piston Rings», Ph. D. Thesis, University of Leeds (1996)
37. Pawlus Pawel, «Change of Cylinder Surface Topography in the Initial Stage of Engine Life», *Wear* 209, (1997), pp 69-83
38. You-Bai Xie, «On the Tribology Design», *Tribology International*, Volume 32, Issue 7, (1999), pp 351-358
39. Priest M., Dowson D. and Taylor C. M., «Predictive wear modeling of lubricated piston rings in a diesel engine», *Wear*, Volume 231, (1999), pp 89-101
40. Priest M. And Taylor C. M., «Automotive engine Tribology- Approaching the surface», *Wear*, Volume 241, Issue 2, (2000), pp 193-203
41. Sung-Woo Cho, Sang-Min Choi and Choong-Sik Bae, «Frictional modes of barrel shaped piston rings under flooded lubrication», *Tribology International*, Volume 33, Issue 8, (2000), pp 545-551

42. Akalin Ozgen and Newaz M. Golam, «Piston Ring-Cylinder Bore Friction Modelling in Mixed Lubrication Regime: Part I- Analytical Results», Journal of Tribology, Volume 123, No 1, (2001), pp 211-218
43. Ji-Young Kim, Jee-Woon Kim, Myung-Rae Cho and Dong-Chul Han, «Friction characteristics of piston ring pack with consideration of mixed lubrication Parametric investigation», KSME International Journal, Volume 16, No 4, (2002), pp 468-475

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000108274

